

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA
DEPARTAMENTO DE GEOGRAFÍA HUMANA



TESIS DOCTORAL

**Ciudades, autómatas celulares y sistemas complejos:
Evaluación de un modelo dinámico de cambio de usos de suelo urbano
de Madrid**

**MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR
PRESENTADA POR**

Jaime Díaz Pacheco

Directores

Javier Gutiérrez Puebla
Juan Carlos García Palomares

Madrid, 2015

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA

Departamento de Geografía Humana



TESIS DOCTORAL

Ciudades, Autómatas Celulares y Sistemas Complejos.

Evaluación de un Modelo Dinámico de Cambio de Usos de Suelo Urbano en Madrid

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Jaime Díaz Pacheco

DIRECTORES

Javier Gutiérrez Puebla

Juan Carlos García Palomares

Madrid, 2015

*" Viento del Este y niebla gris
anuncian que viene lo que ha de venir.
No me imagino lo que va a suceder,
mas lo que ahora pase ya pasó otra vez"*
P.L. Travers, 1934

RESUMEN

Los modelos geográficos y dinámicos de cambio de usos del suelo han tenido un desarrollo innegable unido al perfeccionamiento de las bases de datos y los programas informáticos de tratamiento de la información espacial. En un principio, como en el mismo desarrollo de la informática, los modelos geográficos computacionales, basados en teorías positivistas y econométricas, comenzaron a operar de la mano de la estadística, la linealidad, el equilibrio y el reduccionismo. Posteriormente, y también unido al modo en que evolucionaba la programación informática y los algoritmos adaptativos, los modelos geográficos comienzan a introducir la teoría de la complejidad para el estudio de los sistemas dinámicos no lineales, lejos del equilibrio y emergentes.

Las ciudades observadas como artefactos humanos cargados de intencionalidad (sobre todo en las ciudades modernas), emergen sin embargo, fruto de la interacción de multitud de elementos, expresando auto-organización. Aún cuando su desarrollo se efectúa bajo directrices de planificación, la ciudad surge y se desarrolla bajo un cúmulo de decisiones colectivas, políticas, intervenciones, gobiernos, departamentos de planificación y administración, para satisfacer multitud de carencias y deseos. Además las ciudades son el mejor ejemplo de sistema humano social dinámico y adaptativo, capaz de responder a cualquier perturbación externa o interna a través de multitud de transformaciones observadas en su comportamiento macroscópico surgido de multitud de interacciones locales.

Los cambios de usos de suelo urbano son uno de los efectos de la evolución adaptativa de las ciudades que se manifiestan localmente y reflejan el tipo de desarrollo y las transformaciones que tienen lugar en un área metropolitana. La dinámica de cambio de usos de suelo urbano puede ser tratada como un sistema complejo y mostrada en modelos simples geográficos basados en autómatas celulares.

En este trabajo se valoran las posibilidades de aplicación de este tipo de modelo dinámica en regiones urbanas mediterráneas tomando el caso de la Comunidad de Madrid como área de estudio. Al mismo tiempo, se pretende analizar la sensibilidad de estos modelos a los cambios de escala-resolución.

ABSTRACT

The geographic land use dynamic models have experienced an undeniable development joint with the improvement of the databases and the software for the treatment of the spatial information. In principle, like on the software development, the computational geographic models started to be operative supported by the statistic, the linearity, the equilibrium and the reductionism, based on positivist and econometric theories. Later, and also together with the software programming evolution and the adaptive algorithms, the geographic models began to introduce the Complexity theory for studying the non linear dynamic systems, far of the equilibrium and emergent.

Despite the cities are observed as human artefacts full of intentionality (over all in the modern cities), they emerge resulting from the interaction of multiple elements, and embody self-organization. Even when its development is produced under planning, the city arises and expands under a lot of collective decisions, politic, policies, governments, land planning departments and administrative agencies, in order to satisfy many lacks and desires. Moreover, the cities are the best example of a human social dynamic and adaptive system, able to respond to any external or internal perturbation through a huge number of transformations that can be observed on their macroscopic behaviour arisen from a large number of local interactions.

The urban land use changes are one of visible effects of the adaptive evolution of the cities that have a local incidence and reveal the kind of development and the transformations on a metropolitan area. The urban land use change dynamic could be treated as complex system, showed on geographic simple models based on cellular automata.

This work assesses the possibilities of application of this kind of dynamic model on urban Mediterranean regions, taken the Community of Madrid as study area. By the way, it attempts to evaluate the sensitivity of these models to the scale-resolution.

AGRADECIMIENTOS

La presentación de este trabajo es la culminación de un trabajo de dedicación constante de una persona. Sin embargo, los grandes avances que se han producido durante el transcurso de esta investigación han tenido siempre que ver con el apoyo y la ayuda de otras instituciones, compañeros, amigos y familia a los cuales debo agradecer enormemente su contribución y sus interacciones.

Mi primer agradecimiento va dirigido al profesor Roger White de la Universidad de Terranova en Canadá. Indudablemente este trabajo está bastante influenciado por su pensamiento y me siento afortunado por ello. A fin de cuentas, para un doctorando que centra su investigación en la evaluación de un modelo dinámico de cambios de usos de suelo, lo mejor que le puede pasar es que pueda compartir sus inquietudes con el padre de ese modelo. Sin lugar a dudas, a él debo agradecerle el recorrido hacia el fondo teórico de esta investigación, el seguimiento de la misma, además de las maravillosas discusiones en bicicleta a lo largo de los canales belgas.

En segundo lugar, aunque no con menor intensidad, estoy ampliamente agradecido con el Catedrático Javier Gutiérrez Puebla, mi codirector de tesis, quien me planteó la existencia de estos modelos basados en autómatas celulares sobre los que hoy he adquirido tanta experiencia, gracias también a su labor constante de impulso y revisión sobre mis trabajos. Además, a él debo agradecerle su apoyo en la búsqueda de financiación para el desarrollo de este trabajo, quién en todo momento no ha dejado de abrirme puertas dentro del mundo académico y profesional, a través de la divulgación de mi trabajo. El desarrollo de esta investigación no hubiera sido posible de ningún modo sin el constante seguimiento del profesor Gutiérrez Puebla, pero sobre todo debo agradecerle todo el aprendizaje necesario para avanzar académicamente y saber adaptarme a la continua evolución de este ámbito.

Mis agradecimientos también a mi codirector de tesis, el Doctor Juan Carlos García Palomares, quién sobre todo en la última fase de la investigación se ha volcado enormemente en el codesarrollo y revisión de mi trabajo. Con él he compartido también innumerables conversaciones que me han ayudado a orientar mi estudio. Una de sus

mejores inversiones ha sido su confianza, a través de la cual siempre he contando con una gran flexibilidad para desarrollar mi investigación.

Mi reconocimiento al Departamento de Geografía Humana de la Universidad Complutense, y a todos sus doctores, profesores y personal con quien he compartido mis inquietudes y quienes me han apoyado enormemente. En especial tengo que agradecer el compañerismo, la amistad y el cariño de Eduardo Rodríguez, Ana Condeço, Eloy Solís, Massimiliano Farris, Iván Velasco, Marta la Torre, Estrella del Mar, Obdulia Monteserín, Carmen Mínguez, Libertad Troitiño, y en los últimos años a Henar Salas, Gustavo Romanillos y Borja Moya. Todos ellos han compartido espacio de trabajo, discusiones académicas, pero sobre todo humor, alegría y buenas energías. En este sentido, debo destacar a Richard Hewitt, el que sin duda ha contribuido con mayor entusiasmo a alimentar el desarrollo tecno-científico de mi investigación, a través de trabajos y discusiones que han dado fruto a una amistad perenne. Jamás podré agradecer lo suficiente su ayuda con la lengua inglesa y su humanidad científica.

Debo agradecer al Ministerio de Ciencia e Innovación por su financiación, así como su apoyo para la realización de estancias breves en otros centros de investigación europeos. Y también expreso mi enorme agradecimiento a la buena acogida del centro I+D VITO en Mol, Bélgica y a los compañeros Inge Uljee, Jean-Luc De Kok, Leen Van Esch, Lien Poelmans y en especial al profesor Guy Engelen, pero sobre todo a Hans van der Kwast quién me ayudó mucho e influyó en mis perspectivas sobre la investigación. En Holanda en el centro I+D RIKS, doy gracias a la maravillosa colaboración de su directora Hedwig van Delden, y al aprendizaje que con ella tuve acerca del calibrado del modelo dinámico de usos de suelo, que no hubiera sido posible sin el inmenso apoyo de los compañeros Christy, Jelle y Roel.

Por último mi infinita gratitud a mis amigos más cercanos durante el proceso, Juan Pablo, Fernando López, Frechi y Sebastián Martín, y desde luego a mi familia y al amor recíproco de mis padres Jaime y Albania y mi hermano Héctor, así como de mi compañera Fayna y de su hija Daniela, cuyo apoyo en todo los sentidos cobra especial valor, porque sin comprender a veces del todo en qué consiste mi dedicación, siempre se han volcado en apoyar la consecución de mis objetivos.

Contenido

Resumen	5
Abstract	6
Agradecimientos	7
<i>BLOQUE I.- INTRODUCTORIO, TEÓRICO Y METODOLÓGICO</i>	<i>13</i>
<i>I.1.- INTRODUCCIÓN</i>	<i>14</i>
I.1.1.- Presentación	14
I.1.2.- Interés Científico	15
I.1.3.- Interés Social	18
<i>I.2.- OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN</i>	<i>20</i>
I.2.1.- Objetivo general	20
I.2.2.- Objetivos específicos	20
I.2.3.- Preguntas de investigación	22
<i>I.3.- ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN</i>	<i>24</i>
I.3.1.- Bloque introductorio, teórico y metodológico	24
I.3.2.- Bloque central en formato de artículos científicos	25
I.3.3.- Bloque final de conclusiones	25
<i>I.4.- MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN</i>	<i>25</i>
I.4.1.- La observación de los usos de suelo como elemento de aproximación al fenómeno urbano	26
I.4.2.- La ciencia de la complejidad aplicada a las ciudades y a la dinámica de cambio de los usos de suelo urbano	30
I.4.3.- La simulación del crecimiento de las ciudades como sistemas complejos a través de modelos basados en autómatas celulares	37
<i>I.5.- PRESENTACIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO</i>	<i>44</i>
I.5.1.- Una región heterogénea	44
I.5.2.- Un espacio de continua expansión urbana	49
I.5.3.- La dinámica de cambio de usos de suelo urbano en Madrid	50
I.5.4.- Sprawl. La dispersión de los usos residenciales	52
I.5.5.- La descentralización concentrada de los nuevos espacios de producción y servicios	54

I.5.6.- Un laboratorio para el análisis del crecimiento urbano en estado latente.	58
I.6.- METODOLOGÍA Y FUENTES	63
I.6.1.- Metodología	63
I.6.2.- Fuentes	74
BLOQUE II.- ARTÍCULOS CIENTÍFICOS	77
II.1.- ORGANIZACIÓN DE LOS ARTÍCULOS.	78
II.1.1.- <i>A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation.</i>	81
II.1.2.- <i>Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas</i>	93
II.1.3.- <i>Urban sprawl in the Mediterranean urban regions in Europe, and the crisis effect on the urban land development: Madrid as study case.</i>	112
II.1.4.- <i>The effect of the neighbourhood, the data conversion, and resampling strategies on land use change dynamical models: an experimental approach</i>	126
II.1.5.- <i>Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software</i>	152
BLOQUE III.- CONCLUSIONES	176
III.1.- CONCLUSIONES	176
III.1.1.- Conclusiones respecto a las preguntas de investigación	176
III.1.2.- Conclusión general	185
III.2.- CONCLUSIONS	185
III.2.1.- Conclusions on research questions	185
III.2.2.- General conclusion	193
III. 3.- LIMITACIONES DEL MODELO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.	194
III.3.1.- Limitaciones del modelo	194
III.3.2.- Futuras líneas de investigación	196
III.4.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	198

Índice de figuras

Figura I-1 Localización del Comunidad de Madrid	45
Figura I-2 Densidad de población y coronas metropolitanas	47
Figura I-3 División de la Comunidad de Madrid en Sistemas Urbanos.....	47
Figura I-4 Agrupaciones de la C.M. regiones relativas a la gestión del transporte.....	48
Figura I-5 División en NUTS de la Comunidad de Madrid	48
Figura I-6 Crecimiento de la población y de la ocupación del suelo. 1950-2005	49
Figura I-7 Dinámica de usos de suelo en la periferia metropolitana de la C.M.	57
Figura I-8 Evolución de la población en la Comunidad de Madrid, 2009-2013	59
Figura I-9 Evolución de la población extranjera en la Comunidad de Madrid, 2009-2013	59
Figura I-10 Evolución de la natalidad y mortalidad en la Comunidad de Madrid, 2009-2013	59
Figura I-11 Comunidad de Madrid. Evolución de unidades catastrales urbanas, 1988-2012 (%)	60
Figura I-12 Número de licencias de obra en la Comunidad de Madrid, 2001-2012	61
Figura I-13 Comunidad de Madrid. Hectáreas de Suelo Urbanizable Sectorizado (SUC) y proporción de SUC por Suelo Clasificado Urbano, 2008.	62
Figura I-14. Primera fase de la investigación	65
Figura I-15.- Segunda fase de la investigación.....	66
Figura I-16.METRONAMICA. Mapa de localización de experiencias de aplicación...	69
Figura I-17. Esquema general del desarrollo de la aplicación.....	70
Figura I-18. Las normas de transición potencial	72
Figura II-1 Vinculación de los artículos científicos con la investigación	78

Índice de Tablas

Tabla I-1. Revistas científicas sobre ciencias complejas y temas que tratan	31
Tabla I-2 Proceso simple, complicado y complejo	35
Tabla I-3 Clasificación básica de modelos de cambio de usos de suelo	41
Tabla I-4 Elementos de un MDUAC	43
Tabla I-5 Crecimiento anual de suelo artificial (ha) por CCAA 1987-2000.	50

Índice de ecuaciones

Ecuación I-1.- Función de transición de Tobler (1979).....	42
Ecuación I-2. Normas de transición. MDUAC	71
Ecuación I-3. Cálculo de vecindad. MDUAC	72

Anexos

Anexo 1. Pesos aplicados en la calibración y validación del MDUAC	227
Anexo 2. Síntesis General de la Investigación	228

BLOQUE I.- INTRODUCTORIO, TEÓRICO Y METODOLÓGICO

I.1.- INTRODUCCIÓN

I.1.1.- Presentación

Los modelos dinámicos de cambio de usos de suelo urbano basados en autómatas celulares (MDUAC) se han convertido de manera innegable en una herramienta de apoyo a la planificación urbana. Las ciudades como artefactos complejos que evolucionan bajo un alto grado de incertidumbre, requieren de enfoques dinámicos que permiten aproximarse mejor a su explicación.

Desde la aparición de los primeros prototipos celulares, capaces de simular el comportamiento evolutivo del cambio de los usos de suelo a través de un conjunto de normas simples de transición (Tobler, 1979) su continuo desarrollo y aplicación hasta la actualidad (2014), supone, cuando menos, una prueba de su éxito como modelo, así como de herramienta de trabajo útil a los planificadores del territorio.

El éxito de los autómatas celulares frente a otros modelos geográficos utilizados para estudiar el fenómeno urbano estriba en su capacidad para simular el comportamiento no lineal e impredecible, que caracteriza a la evolución de las ciudades. Por lo general, los modelos son capaces de explicar la expansión urbana en una evolución que tiende hacia un hipotético equilibrio, pero la mayoría están limitados a la hora de simular los cambios de usos de suelo en cualquier dirección, tal y como pueden hacerlo los MDUAC.

Otra particularidad que confiere a los MDUAC una vida saludable, dentro de las técnicas geográficas de simulación espacial, es su potencial para aplicar las teorías de la Complejidad o de los sistemas complejos al fenómeno de la urbanización. Las ideas que engloban este pensamiento complejo se originan en las ciencias "físicas", pero han sido ya incorporadas a las ciencias sociales. La arquitectura, la economía, la historia, la sociología, la geografía, el urbanismo... son sólo algunos ejemplos de disciplinas donde los sistemas complejos han sido introducidos para dar explicación a muchos fenómenos.

La complejidad se aborda desde una perspectiva en la que los sistemas evolucionan en el tiempo adaptándose a través de interacciones entre los elementos que lo componen y

con factores externos, de modo que los mismos exhiben auto-organización, generando comportamientos emergentes y estructuras más o menos complejas al observarse de manera conjunta. Se abandona la idea mecanicista de que los sistemas tienden de forma natural hacia un equilibrio dado, y de que la estabilidad es el estado normal de un sistema es su causa final (Dennis y Urry, 2013).

Este trabajo, cuyos objetivos concretos se tratarán más adelante, evalúa algunos elementos que conforman un MDUAC, como la escala-resolución de una aplicación desarrollada sobre una región cuya extensión corresponde a la que limitan las fronteras administrativas de la Comunidad Autónoma de Madrid (España). Para ello, se ha llevado a cabo una ardua tarea de recopilación de datos a escala de detalle, referentes a los cambios de usos de suelo en dicha región para los momentos temporales 2000, 2006 y 2009. Además esta información fue comparada con CORINE Land Cover, una de las bases de datos europeas más utilizadas para la monitorización de los usos y cobertura de suelo (Díaz-Pacheco y Gutiérrez, 2013), con el objetivo de que tanto el modelo como los resultados tuvieran como fuente principal de información una base sólida sobre la que poder ser evaluados.

I.1.2.- Interés Científico

Entre las muchas aseveraciones que se pueden encontrar acerca de la importancia de la observación de los cambios de usos y cobertura de suelo, la afirmación del científico B. L. Turner II resulta bastante gráfica, cuando se refiere a que "no es suficiente conocer las dinámicas socio-ambientales que expanden, contraen o intensifican un uso de suelo en particular; la comunidad que estudia el cambio global necesita conocer donde han tenido lugar estos cambios" (Turner, 2001, p. 271). En este sentido, la aplicación de alguna de las metodologías y técnicas existentes, empleadas con el objeto de conocer la localización, el tipo y la magnitud de los cambios de usos de suelo en una región, a la vez que desarrollan el conocimiento en este campo, contribuyen a la mejora de las mencionadas metodologías y técnicas, en cuanto a que su uso se somete al juicio del investigador, quién además lo comparte con el resto de la comunidad científica.

En este trabajo la atención sobre los cambios de usos de suelo se focaliza en la expansión de los usos de suelo urbano. Además, se ocupa de explicar en base a simulaciones aplicadas, la manera en que distintas clases de suelo urbano se distribuyen en una región como en una maniobra de competencia por la ocupación del suelo. Se parte del principio de que el funcionamiento de este sistema está organizado por el desarrollo de unos patrones o unas normas simples de interacción, que en definitiva son las que pretenden ser captadas por un modelo que se integra dentro de las teorías de los sistemas complejos y las ciudades.

Si bien esta cuestión se abordará algo más detallada en el apartado 4 donde se tratan los aspectos teóricos de esta tesis, el hecho de que parte de este trabajo se encuentre inmerso en el campo de la teoría de los sistemas complejos y las ciudades, significa que está vinculado a una corriente científica, que dentro de los estudios urbanos, está funcionando como nexo de unión entre las que Portugali (2011, pp. 9-15) denomina las *Dos Culturas de la Ciudad*¹ (científicas). Donde encontraríamos las corrientes Estructuralistas, Marxistas y Humanistas *versus* los enfoques Positivistas/Cuantitativos. En este sentido, el desarrollo de trabajos como el presente pueden estar cimentando la oportunidad de aunar el esfuerzo de dos posturas de pensamiento a cerca de la ciudad que, como afirma J. Portugali, pueden encontrar en las teorías de la complejidad su punto de conexión.

Esta tesis explora de manera sistemática la escala como uno de los elementos que integran los MDUAC, uno de los modelos que más han tenido desarrollo durante las últimas décadas para simular el crecimiento urbano con un impresionante rango de aplicaciones (Torrens y O'Sullivan, 2001). Para ello un MDUAC, cuyo diseño y aplicación inicial corresponde a los científicos Roger White y Guy Engelen (White y Engelen, 1993) fue calibrado y validado en una aplicación para simular los cambios de usos de suelo en la región de Madrid. Este hecho, si bien no incorpora un nuevo modelo de cambio de usos de suelo a la investigación en este campo, sí contribuye

¹ El término fue referido por el trabajo de tesis del británico C.P. Snow (1959) *The Two Cultures*, para referirse a la existencia de dos culturas en la ciencia y entre los científicos (Portugali, 2011).

enormemente a la experimentación y el estudio de la aplicación de un modelo ya existente, en una región metropolitana europea de carácter mediterráneo (Madrid), al mismo tiempo que evalúa elementos del modelo, como ya se ha mencionado.

Los modelos geográficos basados en autómatas celulares, si bien continúan hoy siendo objeto de estudio, han pasado ya del campo de la investigación (Tobler, 1979; Couclelis, 1989; White y Engelen 1993; Batty y Xie 1994; Cecchini 1996; Clarke et al., 1996; Itami, 1998; White y Engelen, 1997; White et al., 1997; Wu y Webster, 1998) al desarrollo y su aplicación (Sleuth, USGS, 1996; Metronamica, RIKS, 2005). Estos modelos son verdaderamente simples, pero sin embargo tienen dos características que los hace extremadamente atractivos para la resolución de problemas geográficos: La primera es que su esencia es espacial en sí misma, y la segunda es que a través de normas simples, estos son capaces de generar formas muy complejas (Katoshevski-Cavari, 2007). De este modo, en general, resultan idóneos para crear estructuras auto-organizativas que evolucionan a través de la aplicación de las mencionadas normas y algunos factores limitantes (ratios de crecimiento, restricciones espaciales...).

Calibrar y validar un MDUAC sobre una región contribuye enormemente a la continuidad en el desarrollo y consolidación de la investigación de estos modelos. De hecho, similares aplicaciones a las que se realizan en este trabajo se han llevado ya a cabo en algunas regiones europeas mediterráneas utilizando distintas aplicaciones basadas en autómatas celulares, como en Lisboa y Portugal (Silva y Clarke, 2002), en Granada (Aguilera, 2006 y Aguilera et al., 2010), en Andalucía (Clavero et al., 2010), en Tesalónica (Lagarias, 2012) e incluso en la misma región de Madrid (Barredo y Gómez, 2008; Hernández-Jiménez et al., 2009; Gallardo Beltrán, 2014). Sin embargo, este hecho no sólo no pone fin al desarrollo de la investigación en este campo, sino que pone de manifiesto el interés que suscita su aplicación entre la comunidad científica que aborda las cuestiones relacionadas con los usos y cobertura de suelo y su modelización a través de MDUAC.

El caso del presente trabajo conlleva variaciones de aplicación que le proporcionan una entidad diferenciada de los ejemplos expuestos en el párrafo anterior. Una de las principales cuestiones de relevancia y aportación respecto a la práctica con estos

modelos de cambio de usos de suelo en las mencionadas regiones y con un enfoque claramente urbano, es el trabajo a escala de grano fino (25x25m. o 50x50m. de resolución), que ha podido ser desarrollado gracias a la previa elaboración de una base de datos de usos de suelo original, a su vez contrastada con otra fuente y cuya metodología de elaboración supone también una contribución de interés (Díaz-Pacheco y Gutiérrez, 2013). Esta posibilidad, ha permitido también evaluar los efectos en la calibración del modelo de los cambios de escala en un MDUAC. Por último, también se ha llevado a cabo un análisis de un modelo dinámico de cambio de usos de suelo basado en algoritmos de redes neuronales artificiales (Díaz-Pacheco y Hewitt, 2014) con el objeto de evaluar su posible aplicación en los cálculos de aptitud del suelo, uno de los elementos que integran este modelo.

I.1.3.- Interés Social

Desde que fueron obtenidas las primeras imágenes aéreas de la superficie terrestre, los métodos y las técnicas para la observación y captación de los cambios de uso y cobertura de suelo han experimentado un desarrollo continuo, que además se ha acelerado con el avance de los sensores remotos y las técnicas de teledetección. El progreso de algoritmos informáticos que automatizan el procesamiento de la información recogida ha ayudado también a generar datos cada vez más precisos y de mayor utilidad. A través de imágenes de la superficie terrestre y a su acumulación temporal, hoy se dispone de información que, no sólo da cuenta de lo ocurrido en un momento y espacio concretos, sino que además, registra los cambios que han tenido lugar a lo largo del tiempo. La observación directa de estos cambios permite conocer como están evolucionando algunos fenómenos, como la expansión o el retroceso de un bosque (di Paolo et al., 2013), el avance de un incendio (Rauste et al., 1997) la extensión de las superficies artificiales o la subida del nivel del mar (Tejera-Cruz y García Weil, 2002).

Además, la información sobre el cambio de usos y cobertura de suelo, también revela la evolución de otros fenómenos producto de la actividad humana, como la emisión de carbono (Achard et al., 2004), la calidad de las reservas de agua subterránea (Srivastava et al., 2012) y otros muchos indicadores derivados, que son al fin y al cabo testigos del

uso que se hace de los recursos del planeta. Estos, en gran medida se revelan como impactos ambientales relacionados con la actividad humana, y ésta a su vez se relaciona con los cambios de uso del suelo, que en definitiva llegan a producir cambios que afectan desde a la composición atmosférica hasta la modificación generalizada de los ecosistemas terrestres (Foley et al., 2005).

La observación directa o indirecta de los cambios que se producen en la superficie terrestre y la cartografía de los mismos a lo largo de una secuencia temporal, permite entonces, monitorizar y explicar multitud de fenómenos y procesos que son esenciales para el desarrollo sostenible de nuestra sociedad, y que pueden al mismo tiempo, ayudar a tomar determinadas decisiones y actuaciones en base al logro de este desarrollo sostenible.

Por otro lado y unido al desarrollo de los métodos y las técnicas de observación del cambio de usos y cobertura de suelo, el desarrollo de modelos capaces de simular los cambios que se observan, facilita las explicaciones de los procesos, ayuda a detectar y a identificar los factores y las causas que intervienen en el mismo, pero sobre todo, a tener una idea de conjunto sobre su funcionamiento. A partir del desarrollo de modelos de cambio de usos de suelo pueden desarrollarse escenarios futuros acerca de cuál será la distribución de estos usos en un territorio dado; cómo afectará la implantación de unas políticas concretas, o cómo afectará a una región la expansión o el retroceso de determinados usos del suelo. A partir de estos escenarios pueden también modelarse posteriormente cuáles serán sus repercusiones en el medioambiente (contaminación del aire, fragmentación de hábitats, contaminación de las aguas...) (Theobald et al., 2011; Gallardo y Martínez Vega, 2012; Wang et al., 2013; Li y Merchant, 2013). Asimismo, si nuestro enfoque tiene que ver con cuestiones de ordenación urbana, los modelos capaces de simular cambios de usos de suelo, demuestran cada vez más su utilidad para apoyar la planificación integrada de la ciudad y su crecimiento ordenado con unos fines determinados. En este caso, los escenarios simulados por un modelo de cambio de usos de suelo pueden servir para conocer los efectos de estos cambios sobre la organización de la ciudad (modos de transporte, accesibilidad, emisión de carbono, dispersión de unidades residenciales, consumo de agua y energía...) (Geurs et al., 2010; Guzmán et al., 2014; Gober et al., 2011; Chingcuanco y Miller, 2012).

Una parte del desarrollo de este trabajo se ha ocupado de la mencionada observación del cambio de usos de suelo en una región metropolitana europea como es Madrid. La cual ha experimentado una importante expansión de suelo urbano en las últimas décadas y con especial interés durante el periodo de estudio (2000-2009), donde al final del mismo, comienza a manifestarse un cambio de tendencia hacia la ralentización del crecimiento urbano. Para este periodo se elaboró una base de datos geográfica de usos de suelo haciendo uso de métodos y tecnologías de vanguardia, pero incorporando también técnicas tradicionales, como la fotointerpretación, ya que a pesar del gran desarrollo de las clasificaciones automáticas de imágenes, aún resulta imprescindible su empleo para diferenciar usos de suelo dentro del medio urbano (Loveland et al., 2010, p. 1315). La elaboración de esta fuente de información permitió luego trabajar en la exploración de los cambios de usos de suelo de la región de Madrid, y al mismo tiempo sirvió como base para investigar sobre algunos elementos de un modelo de simulación de cambio de usos de suelo de cuyo desarrollo se han extraído conclusiones que servirán para entender mejor la aplicabilidad de estos modelos y su funcionamiento, con el objetivo de incrementar su utilidad social.

I.2.- OBJETIVOS Y PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

I.2.1.- Objetivo general

Esta investigación surge con el propósito de evaluar el uso de herramientas para el modelado dinámico de cambio de usos de suelo urbano basado en autómatas celulares (MDUAC). Se plantean dos objetivos generales, por un lado el de valorar sus posibilidades de aplicación en regiones metropolitanas mediterráneas, que tienen dinámicas de desarrollo urbano particulares, tomando para ello como área de estudio la Comunidad de Madrid. Por otro lado, se pretende analizar la sensibilidad de estos modelos a los cambios de escala-resolución.

I.2.2.- Objetivos específicos

La consecución de los objetivos generales propuestos en este trabajo supone la ejecución de los siguientes objetivos específicos:

1. Establecer un marco teórico que permita sentar las bases de la Tesis, revisando la literatura sobre estudio de los usos del suelo en las áreas urbanas, dentro del marco de los sistemas complejos y con el acento de la aplicación de modelos dinámicos de cambio de usos de suelo basados en autómatas celulares.
2. Elaborar una base de datos (bbdd) geográfica en la Comunidad de Madrid, enfocada sobre los usos de suelo urbanos y con diferentes escenarios temporales. El propósito es que pueda ser utilizada como una base sólida de información para elaborar modelos de simulación urbana en escalas de detalle (a partir de 1:10.000).
3. Evaluar la bdd desarrollada frente a CORINE Land Cover, en cuanto que CORINE es una de las fuentes de usos de suelo más desarrolladas y utilizadas en la Unión Europea para el monitoreo del cambio de uso y cobertura de suelo.
4. Realizar un análisis de los cambios de usos de suelo en la región metropolitana de Madrid (Comunidad Autónoma) entre los periodos 2000-2006-2009, que sirva para alimentar los modelos y ayudar a explicar sus resultados. Este periodo cobra especial interés además en cuanto a que la región comienza a mostrar un cambio de tendencia en los ritmos y la magnitud de la expansión del suelo urbano desde el año 2007.
5. Calibrar y validar un modelo de simulación de cambio de usos de suelo basado en autómatas celulares y aplicado a la Comunidad de Madrid a partir de la bdd desarrollada y los tres estadios temporales considerados. Tener esos estadios, a modo de *snapshot* sobre los usos de suelo desarrollados bajo una metodología uniforme y por el mismo equipo de trabajo, permite contar con una base para la calibración del modelo aplicado (2006) y otro estadio posterior para realizar una validación del mismo (2009).
6. Evaluar la sensibilidad del modelo de simulación de cambio de usos de suelo basado en autómatas celulares a los cambios en la escala empleada. Para ello se calibrarán y validarán distintas aplicaciones, en los que se aplica distinta resolución de celda, comparando después los resultados entre cada una de las situaciones.

7. De manera paralela se evaluarán los métodos de agregación de información de uso más comúnmente utilizados para conformar los datos de entrada de estos modelos en cuanto a la información raster de usos de suelo.

8. Valorar otras técnicas de modelización espacio-temporal para la simulación de cambios de suelo, como el uso de redes neuronales artificiales y explorar su posible combinación con los modelos de simulación urbana basados en autómatas celulares.

I.2.3.- Preguntas de investigación.

Los objetivos ya señalados están dirigidos por las preguntas de investigación que se detallan a continuación:

a) ¿Cuáles son los aspectos a considerar en la aplicación de MDUAC en regiones urbanas mediterráneas como la de Madrid?

Esta pregunta tienen un carácter inicial y está en relación con los objetivos generales que guían la investigación. Esta pregunta debe proporcionarnos el esquema de la estructura final de la tesis, de manera que para dar respuesta a esta pregunta debemos revisar la literatura sobre el estudio de las dinámicas de uso del suelo y su modelización y establecer el marco teórico, plantearnos las necesidades en relación a las fuentes cartográficas e indagar en la metodología a utilizar y los aspectos a los que pueden ser sensibles esos métodos.

b) ¿En qué medida puede mejorar la observación de los cambios de usos de suelo urbano contar con una base de datos de usos de suelo de detalle?

Para resolver esta cuestión se ha hecho precisa la necesidad de elaborar una base de datos geográfica de usos de suelo de detalle (1:10.000), que recoge tres periodos temporales, para posteriormente compararla con otra base de datos existente y fiable, con periodos temporales similares, pero de menor resolución espacial (CORINE Land Cover). La respuesta a esta pregunta pretende despejar dudas dentro de la comunidad científica que estudia los usos de suelo urbanos, en cuanto a las pérdidas de exactitud posicional (localización de un uso, localización de un cambio) y de atributo (tipo de

uso, tipo de cambio o transición), a las que se somete un estudio de acuerdo a la escala-resolución de la base de datos de usos de suelo empleada.

c) ¿Cuáles han sido las pautas generales de transformación de la región metropolitana de Madrid, en cuanto a la ocupación por suelo urbano y su distribución, para la primera década del siglo XXI, y observadas a escala de detalle?

La calibración de un MDUAC, realizada de manera empírica, requiere de manera ineludible la tarea de análisis previo de las pautas generales y comportamiento de cambio y transición de usos de suelo en una región para el periodo inicialmente simulado. De este modo el investigador también consigue familiarizarse con el territorio y la región de estudio a través de la observación de estas pautas. En este trabajo esta pregunta no define uno de los fines últimos de esta investigación, sin embargo, la elaboración de una respuesta a la misma contribuye a la explicación y al estudio de las transformaciones urbanas que en este periodo tuvieron lugar. Esto se consigue a través de un análisis pormenorizado del cambio de los usos de suelo urbano en la región de Madrid, entre los años 2000 y 2009.

d) ¿Cuáles son las reglas de transición que definen los patrones de cambio de los usos de suelo urbano de la región de Madrid reconocidas a través del desarrollo de un MDUAC?

Los MDUAC son modelos en los que las propiedades de cada célula (cada celda que representa una proporción del espacio) está determinada fundamentalmente por las relaciones entre esta célula y las células vecinas más cercanas (Portugali, 2011, p. 107). En este sentido, las reglas de transición que definen los patrones de cambio de usos de suelo en un MDUAC se reconocen a través de estas relaciones de vecindad. Estas reglas, revelan interacciones entre los usos de suelo, cuya energía de dinamización se alimenta de la competencia por la ocupación del suelo de los diferentes usos y de una serie de dependencias de atracción y repulsión entre los mismos. En este trabajo, a través de la búsqueda de estas reglas de transición en el ejercicio de calibración del MDUAC, se reconocen estas reglas, exponiendo los resultados obtenidos que serán de enorme utilidad para futuras calibraciones de regiones similares a la tratada.

e) ¿Qué efecto tiene el cambio de los factores de escala en un MDUAC urbano?

El cambio de escala-resolución en el estudio de la evolución de los usos y cobertura de suelo a través de su cartografía como base de análisis, no sólo tiene efectos sobre la observación. Dentro del desarrollo de los MDUAC, en este caso de enfoque sobre los usos de suelo urbano, el cambio de escala-resolución no es una cuestión *naïve* (Ménard y Marceau, 2005). En este trabajo se realiza un ejercicio empírico de aproximación hacia la dependencia del modelo sobre los factores de escala. Para ello, una aplicación de MDUAC una vez calibrada y validada, se somete a cambios en la escala de sus datos de origen y de su vecindad para responder a la pregunta planteada.

f) ¿Existe la posibilidad de combinar los modelos basados en autómatas celulares, con otros modelos de carácter más predictivo, como los desarrollados bajo algoritmos de redes neuronales artificiales?

Los MDUAC, tanto en su versión más simple (autómatas celulares) como en su versión más compleja (basados en agentes), han tenido gran desarrollo y aplicación en el campo de la simulación urbana y los usos de suelo. Sin embargo, otros modelos dinámicos más orientados a ambientes predictivo-explicativos, como los basados en regresión o en modernos algoritmos de redes neuronales artificiales (RNA), continúan desarrollándose de manera paralela. Este trabajo evalúa a través de su aplicación uno de estos modelos basados en RNA, con el objetivo de valorar sus aptitudes y, tal y como se plantea en la pregunta, conocer sus posibilidades de combinación con los MDUAC.

I.3.- ESTRUCTURA DE LA INVESTIGACIÓN.

La presente investigación se estructura en tres bloques: 1) Bloque introductorio, teórico y metodológico; 2) Bloque central en formato de artículos científicos; y 3) Bloque final de conclusiones.

I.3.1.- Bloque introductorio, teórico y metodológico.

Su contenido se organiza a partir de una breve introducción donde se realiza una presentación inicial del trabajo y luego se recogen dos pequeños apartados que reflejan

el interés social y científico de esta tesis. Posteriormente se exponen en el apartado 2, los objetivos y las preguntas de investigación, para luego continuar describiendo la estructura de la investigación, en el presente apartado (3). En el apartado 4 se explica el marco teórico de la investigación, donde se definen tres puntos sobre cuestiones que se ha considerado que trascienden la investigación en lo que a sus aspectos teóricos se refiere: Los usos de suelo y la ciudad; los sistemas complejos, la ciudad y los modelos dinámicos; y los autómatas celulares como herramientas complejas para simular la ciudad. En el apartado 5 se realiza una presentación del área de estudio y por último, en el apartado 6 se expone de manera general la metodología y las fuentes más importantes empleadas en el presente trabajo.

I.3.2.- Bloque central en formato de artículos científicos

Este bloque conforma el eje de la investigación y está compuesto por la conjunción de un total de cinco documentos en formato de artículo científico, siguiendo la normativa vigente en el Departamento de Geografía Humana de la Universidad Complutense de Madrid en relación a las Tesis Doctorales. Todos los artículos presentados están firmados en primer lugar por el doctorando, y cuatro de ellos están ya publicados en diferentes revistas de cierto impacto. Este bloque incluye un apartado (6) donde se introducen los artículos y su contenido, con relación a los objetivos y las preguntas de investigación.

I.3.3.- Bloque final de conclusiones

En este bloque se realizan las conclusiones generales sobre el presente trabajo de tesis, tratando de aunar también las principales determinaciones extraídas de los artículos. Se exponen del mismo modo, algunas futuras líneas de investigación con relación a este campo.

I.4.- MARCO TEÓRICO DE LA INVESTIGACIÓN.

El desarrollo de este trabajo, las técnicas y los métodos empleados, se encuentran dentro del marco que reúne los esfuerzos de investigación para aplicar las teorías de la complejidad o de los sistemas complejos al estudio de la ciudad, al desarrollo urbano, su

evolución y transformaciones. Dentro de esta gran cubierta subyace otra concepción de base, como lo es la aproximación a la explicación de las ciudades a través de la observación del cambio de los usos de suelo, ritmos de crecimiento, su localización y distribución, así como la morfología urbana asociada a este último particular. Tanto la aplicación de las teorías de los sistemas complejos, como la observación del cambio de los usos de suelo, pasan por el reconocimiento inicial de la posibilidad de representar espacio-temporalmente las propiedades que conforman el fenómeno urbano. En este sentido, la mayoría de los enfoques surgidos a partir de la observación de estas representaciones, parten de un modelo previo de abstracción que convierte al objeto geográfico de estudio (las ciudades, los usos de suelo, la accesibilidad, las actividades...) en un elemento meta-científico a partir del cual se construyen otros modelos, aproximaciones y teorías.

Dicho esto, sería entonces conveniente comenzar por tratar de resumir en este apartado teórico del trabajo, algunos aspectos de fondo sobre: 1) La observación de los usos de suelo como elemento de aproximación al fenómeno urbano; 2) La ciencia de la complejidad aplicada a las ciudades y a la dinámica de cambio de los usos de suelo urbano; y 3) La simulación del crecimiento de las ciudades como sistemas complejos a través de modelos basados en autómatas celulares.

I.4.1.- La observación de los usos de suelo como elemento de aproximación al fenómeno urbano.

Como elemento operativo en la planificación del espacio de una región cuyo desarrollo se encuentra enormemente influenciado por actuaciones urbanas, el ejercicio de clasificación a partir de los usos de suelo ocupa un importante lugar en su ordenación. Los productos e indicadores ambientales derivados de la observación del suelo, como cálculos de ocupación de suelos agrícolas, fragmentación de hábitats, polución, contaminación del aire, evolución de los suelos impermeables, etc. convierten la observación de los cambios de uso de suelo en una potente herramienta para la planificación y la ordenación del territorio. Pero además, al margen de su utilidad práctica y operativa, instalada ya en el proceder de los elaboradores de planes y políticas territoriales, la observación y explicación del cambio de los usos de suelo se muestran

también como elementos de aproximación explicativa al fenómeno urbano y a los procesos de urbanización.

El estudio de la localización y organización de la urbanización en el territorio ha sido enfocado por muchos autores hacia la búsqueda de patrones más o menos universales acerca de la ocupación del suelo y a su localización. Un elemento común dentro de estos estudios es el análisis de los cambios, la localización y distribución de los usos de suelo para explicar la estructura de las áreas urbanas, para desde esta perspectiva, aproximarse a la comprensión del funcionamiento y organización de las ciudades.

La observación de los usos de suelo está presente, tanto en el tradicional estudio descriptivo de las ciudades, desarrollado en gran medida a través de la búsqueda de una síntesis visual del paisaje urbano (Batty y Longley, 1994. p. 7), como dentro, por ejemplo, de la denominada revolución cuantitativa impulsada a partir de la segunda mitad del siglo XX, y que arranca con un nuevo concepto de teorización sobre los objetos de estudio, en una disciplina que hasta entonces se mostraba excesivamente descriptiva (Barnes, 2001). Las teorías surgidas de este giro cuantitativo, ya desde los trabajos clásicos y pioneros de Von Thünen (1826), Weber (1909), Christaller (1933) y Lösch (1940) que inspiraron este nuevo enfoque, se ocupan en gran medida de la búsqueda y explicación analítica de patrones y formulación de teorías de localización de las actividades económicas, entre las cuales, generalmente se encuentra, al menos de manera implícita, la urbanización. Dichas explicaciones teóricas, aún cuando sus enfoques pueden estar centrados en costes de transporte, aglomeración de bienes y personas, centralidades económicas, distancias a los grandes centros de consumo, localización de las actividades productivas, etc., siempre parten en menor o mayor medida de la observación inicial de la disposición de los usos de suelo, ya sea en un espacio hipotético (ver ideas clásicas de Von Thünen, 1826) o realmente observado, puesto que su estado y evolución, reflejan en gran medida la actividad humana y sus relaciones consigo misma o con su entorno. Además, aunque el suelo no es uno de los factores de producción determinantes en la mayoría de los modelos de localización, sí es uno de los que puede determinar que la actividad urbana no se concentre toda en un mismo lugar (Krugman, 1991a). Esto quiere decir, que puede ser un elemento de divergencia cuando dos localizaciones que presentan otros factores de producción de

similares características (coste de transporte, economías de escala, etc.) presentan distinto grado de crecimiento urbano. Del mismo modo, las características de una región observadas a través de la localización de la actividad económica y de sus usos de suelo (urbano, agrícola, industrial...), presentan una relación intrínseca consigo misma, es decir, que existe una dependencia histórica entre la localización en una región de nuevos desarrollos urbanos o industriales y la localización de una ciudad o un área industrial previa en la misma región (Krugman, 1991b).

La observación de la dinámica de los usos de suelo es, en definitiva, un factor clave para el estudio de las grandes áreas metropolitanas desde un amplio abanico de perspectivas geográficas. Este fenómeno se produce cuando los procesos de urbanización, por medio de los cuales la población tiende a concentrarse espacialmente en grandes áreas urbanas de altas densidades de población, generan un complejo marco de relaciones geográficas, económicas y sociales, que se desarrollan sobre un tejido urbano más o menos difuso. Cuando se superan unos determinados umbrales, sobre todo en lo que se refiere a concentración de población y actividad, este fenómeno se suele conceptualizar en lo que se denominan regiones metropolitanas.

La aproximación al estudio de las grandes regiones metropolitanas se ha llevado a cabo desde muy diversas perspectivas y atraído a diversas disciplinas, si bien es cierto que el hecho urbano es en última instancia un fenómeno territorial al que la Geografía ha prestado atención, atendiendo frecuentemente al factor endógeno de la distribución y localización de los usos de suelo, en ocasiones como causa y en ocasiones como producto de los procesos de conformación del espacio de una región fuertemente influenciada por la metropolización.

La estructura y la dinámica de las nuevas ciudades europeas y norteamericanas están presentando una expansión sin precedentes y una profunda reestructuración interna. Las recientes transformaciones urbano-metropolitanas y la configuración de un nuevo tipo de ciudad dispersa, fragmentada, descentralizada no se pueden explicar desde perspectivas parciales (Gutiérrez Puebla, 2003). Por ello han surgido numerosos enfoques que tratan de abordar el fenómeno urbano-metropolitano desde muy diversas líneas, como por ejemplo el análisis de las relaciones entre la tecnología, la información

y el espacio, responsable de generar relaciones más débiles y difusas entre éste último y el individuo (Castells, 1985; Santos 1996; 2000); líneas que ponen énfasis en las metrópolis como producto y elementos clave del proceso de globalización (Sassen, 1998; 2007); líneas que atienden a la configuración socio-económica de las estructuras urbanas como las teorías de contra-urbanización (Berry, 1980; Arroyo, 2001) que en definitiva tratan de explicar y aproximarse a una recomposición del espacio urbano, producto de las nuevas relaciones producidas entre la Ciudad Central y el hinterland circundante (Aurtenetxe, 1993); y/o líneas que sin dejar de atender a los elementos exógenos que rodean e influyen a la configuración del espacio metropolitano, se centran en atender el producto final obtenido, reflejado en los nuevos patrones de localización de las diferentes actividades productivas urbanas y la distribución de los usos de suelo, que en última instancia son las que reflejan en gran medida *modus vivendi* y *modus operandi* de los espacios metropolizados.

Méndez (2007), señala la existencia de una dicotomía entre la bibliografía que trata de analizar los procesos que transforman las metrópolis, aislando una serie de investigaciones realizadas a través del análisis de procesos de base económica, tecnológica o sociocultural (Sassen, 2003; Soja, 2000; Castell, 1997; Amendola, 2000; citados en Méndez, 2007) y otro grupo preocupado principalmente por las nuevas formas urbanas resultantes (Ascher, 1995; Garreau, 1992; Dematties, 1998; y Nel.lo, 1998; citados en Méndez, 2007). Desde este punto de vista, este trabajo debe situarse en éste último grupo en cuanto a que el análisis de la distribución de usos de suelo en cualquier dirección (estática, dinámica, predictiva, normativa...), al final acaba desentrañando de algún modo la estructura espacial urbana resultante de un proceso que se supone puede tener definición mediante el modelo de simulación tratado.

En resumen, el análisis de los usos de suelo de una de las actuales regiones metropolitanas, puede servir de apoyo a cualquiera de los enfoques y perspectivas desde los que ésta quiera ser tratada, si bien las líneas de investigación que utilizan este análisis de manera más directa, son aquellas que relacionan la forma urbana con otros elementos metropolitanos como pueden ser el transporte (Badoe y Miller, 2000; Gutiérrez Puebla, 2003; García Palomares, 2007); la localización de la actividad productiva y la economía metropolitana (Méndez, 2001); la propia ingesta de suelo

inherente al crecimiento del tejido urbano desde comportamientos urbanos no planificados (Barredo, 2004); o el impacto sobre el paisaje y la fragmentación territorial de la metropolización (Aguilera, 2006).

I.4.2.- La ciencia de la complejidad aplicada a las ciudades y a la dinámica de cambio de los usos de suelo urbano.

La ciencia de la complejidad o de los sistemas complejos es una ciencia aún por definir pero en rápida expansión, enfocada en el estudio de los sistemas complejos adaptativos. Desde 1999 existe una gran comunidad científica en red, denominada *Complexity Digest*, fundada en la Universidad Nacional Autónoma de México, y que en 2014 se ha convertido en el canal oficial de la Sociedad Internacional para los Sistemas Complejos (*Complex Systems Society*). Además, actualmente existen multitud de revistas científicas relacionadas con esta ciencia (*Complexity, Journal of Complexity, Complex Systems, Advances in Complex Systems*, etc.), cuyo enfoque y cuestiones tratadas dan cuenta de su multidisciplinariedad y del conjunto de herramientas, teorías y aplicaciones que engloba (Tabla I-1). En este sentido, estos datos señalan, el atractivo e interés que esta ciencia está produciendo en la comunidad científica.

La complejidad es una ciencia que surge en cierta contraposición al pensamiento 'simplificante' en el que, y sobre todo dentro de las ciencias físicas, el conocimiento de los sistemas puede ser reducido al de sus partes simples o unidades elementales que los constituyen (Morin y Le Moigne, 1999, pp. 43-77). Esta disyunción de los elementos, quizás esté minimizando los efectos de las interacciones, cuyas reglas de funcionamiento son un factor clave para entender el todo.

La definición de ciencia de la complejidad, si bien, multitud de ámbitos de investigación se engloban en este campo, no ha terminado de definirse, e incluso hay autores que señalan que la determinación de la misma es una cuestión basada en la decisión ontológica del investigador (O'Sullivan, 2004). Sin embargo, lo que sí es incuestionable es que la principal ocupación de esta ciencia es explicar de qué manera se produce el comportamiento de los denominados sistemas complejos (Mitchell, 2009. p. 13).

Tabla I-1. Revistas científicas sobre ciencias complejas y temas que tratan

Journals	Some topics, issues, scope and aims
<i>Complexity</i>	Chaos Genetic algorithms Cellular automata Neural networks Evolutionary game theory
<i>Advances in Complex Systems (ACS)</i>	Agent based models of social organizations Social and economic networks Evolutionary game theory, cooperation Economic growth, financial systems, systemic risk Traffic and environmental systems
<i>EPJ B: Condensed Matter and C. Systems</i>	Chaos and nonlinear dynamical systems Collective dynamics and self-organization Science of networks Multi-scale modeling Cellular automata and agent-based modeling
<i>Complex Systems</i>	Cellular automata Self-organized systems Emergence Complex networks
<i>Journal of Complexity</i>	Nonlinear and algebraic equations Approximation theory Markov chain Monte Carlo Machine learning Computational stochastics
<i>Complexity International</i>	Artificial life Cellular automata Chaos theory Control theory Fractals
<i>Emergence: Complexity and Organization</i>	Complex adaptive systems Organizational learning Complexity and Human Interaction Dynamics Complexity and Public Policy Complexity and Society

La aplicación de la teoría de los sistemas complejos surge de la búsqueda de explicaciones a las claves del funcionamiento de muchos fenómenos de organización, tales y tan diversos como un huracán, el sistema inmunológico, la agrupación celular en tejidos, el sistema nervioso, el comportamiento colectivo de alguna comunidad de

organismos sociales (hormigas, termitas, humanos...), la selva tropical, el fenómeno de la urbanización, e incluso la propia inteligencia y la conciencia, la cual emerge a partir de elementos no conscientes y no inteligentes (Mitchell, 2009, p. 4).

Si bien no existe una definición concisa de un sistema complejo (Ladyman et al., , 2013), existen propuestas bastante integradoras y simples, como la que aporta M. Mitchell, donde lo define como *un sistema con un comportamiento conjunto, sin ningún tipo de líder o controlador, esto es, de manera auto-organizada. A partir de reglas simples estos sistemas son capaces de generar comportamientos complejos, no lineales y muy difíciles de predecir, y cuyo comportamiento organizado se suele señalar como emergente* (Mitchell, 2009. p. 13).

Los sistemas complejos, cuyo concepto proviene de la física y de una rama de las matemáticas, dedicada al estudio de los sistemas dinámicos, se desarrolla hoy dentro de esta disciplina, sobre todo en dos áreas de manera más intensa, la teoría del caos y la geometría fractal, ambas fuertemente enfocadas al estudio de los atractores² y los sistemas dinámicos de comportamiento no lineal. Esto quiere decir, que los sistemas complejos operan lejos de la búsqueda de un equilibrio (Castellani y Hafferty, 2009. p. 57). En este sentido los sistemas complejos también se señalan por poseer características de comportamiento caótico, donde pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, pueden generar posteriormente grandes cambios en la dinámica del sistema ("el aleteo de las alas de una mariposa en Argentina, puede producir un huracán en el Caribe").

Otra cualidad de los sistemas complejos es el comportamiento '*fat-tailed*' (cola gruesa), sobre todo empleado en su aplicación a los mercados financieros, donde los eventos extraordinarios ocurren más a menudo de lo que indicaría una curva normal de distribución. De ahí el término '*fat tail*', ya que en referencia a una distribución normal, esta alcanza valores de distribución más altos en los extremos (colas de la curva). Este fenómeno se asemeja al de '*black swan*' (cisne negro) retratado por el ensayista

² Un atractor es (*grosso modo*) un conjunto compacto hacia el que todas las soluciones del sistema se aproximan cuando el tiempo se hace grande (ver Caraballo et al., 2003).

financiero Taleb N. (2010), donde refleja el impacto masivo y la transformación inmediata que incorpora en un sistema, un evento inicialmente muy improbable (ataque a las torres gemelas en New York, Crash financiero 2007-2008...). Otro ejemplo gráfico de este fenómeno es la formación de los átomos carbono en la superficie solar, los cuales surgen de la interacción altamente improbable y aleatoria de tres átomos de helio; después de muchas generaciones de soles en nuestro sistema solar; se crea una cantidad considerable de átomos de carbono, que luego permiten una amplia reserva necesaria para la creación y el desarrollo de la vida (Morin y Le Moigne, 1999, pp. 43-77). De este modo, posteriormente a producirse este hecho poco probable, éste se introduce como un fenómeno menos aleatorio y más predecible en las explicaciones del sistema.

Su propiedad adaptativa a través de un comportamiento 'de abajo a arriba' es otra cualidad que se destaca de los sistemas complejos, donde la adaptación se produce por la interacción entre los elementos que lo componen, produciendo estructuras emergentes y pudiendo retroalimentarse a partir del desarrollo subsecuente de aquellas interacciones (Levin, 1998).

Las Ciencias Sociales, como otras disciplinas, han identificado también los sistemas complejos para la explicación de los sistemas dinámicos de comportamiento no lineal, en este caso aplicados a fenómenos sociales o estructuras generadas por el ser humano. De este modo, y volviendo a la definición de sistema complejo anteriormente expuesta de M. Mitchell (2009), en este sentido, podría considerarse, por ejemplo, una red adaptativa constituida por una amplia serie de agentes sociales, que a través de unas simples reglas (ej. estrategias de comunicación) pueden crear todo tipo de productos complejos, muchos de los cuales no podrán predecirse o repetirse con certeza. Este ejemplo puede ser representativo de una hipotética identificación de un sistema complejo que quiere estudiarse bajo esta óptica, sin embargo, y remitiéndonos a la no existencia de un acuerdo formal sobre qué es un sistema complejo: ¿cuándo puede afirmarse que el fenómeno tratado puede ser considerado como tal?

De acuerdo a Cilliers (1998, pp. 2-5) la mejor forma de identificar un sistema complejo, debido a la falta aún de un acuerdo 'formal' de su definición, es observar cuál de las

diferentes propiedades atribuidas a éstos (muchas de ellas mencionadas anteriormente), exhibe el sistema físico, matemático, biológico, social, geográfico, ecológico... en cuestión. En este sentido, Castellani y Hafferty (2009. p. 124), presentan una lista básica de estas propiedades que a continuación se detallan:

1. Los sistemas complejos son dinámicos; con lo que dependen del tiempo.
2. Están basados en agentes, constituidos por un gran número de ellos, e interactuando, exhiben comportamientos emergentes, 'de abajo a arriba' para conformar el sistema que comprenden.
3. Funcionan a través de reglas: los agentes interactúan a través de una serie de normas simples (reglas, códigos, prescripciones, parámetros, estrategias de comunicación...)
4. Exhiben auto-organización. Sin supervisión externa o interna, o meta-reglas predefinidas, los agentes se organizan por sí mismos a través de sus interacciones.
5. Son relativamente estables, si bien funcionan lejos de alcanzar el equilibrio 'se mueven entre el caos y el orden absoluto'.
6. Se localizan en entornos relativamente (escala) amplios (i.e. world wide web, ciudades, una colonia de hormigas...)
7. Evolucionan adaptativamente. Se adaptan a cambios exógenos o endógenos a través de sus propios medios, auto-comunicación o retroalimentación.
8. Son emergentes. No pueden ser reducidos a las reglas o los agentes que lo componen. No son el resultado de la suma de sus partes.
9. Son construcciones intelectuales.

Una vez explicado qué es un sistema complejo, la siguiente cuestión que se quiere plantear es ¿en qué medida las ciudades y la evolución dinámica de los cambios de usos de suelo urbano constituyen sistemas complejos?

En principio, las ciudades son en sí artefactos humanos complejos, y a diferencia de otros objetos construidos por el ser humano, su complejidad es tal que se renuncia a una total comprensión de la misma (White et al., , 2000). Sin embargo, planteado de esta manera podría también entenderse desde el punto de vista de aquello que es complicado

o difícil de interpretar. Lo complejo, en los términos en los que se está definiendo en este trabajo, alcanza, como se ha visto en las definiciones anteriormente expuestas, otra connotación que la de aquello que es complicado (complicado y complejo, se emplean como sinónimos).

Glouberman y Zimmerman (2004), ilustraron muy bien este aspecto en un trabajo donde fundamentaban el sistema de salud pública como un sistema adaptativo y complejo, exponiendo un ejemplo sobre tres problemas, uno simple, otro complicado y otro complejo. El simple consiste en seguir una receta de cocina; el complicado, lanzar un cohete a la luna; y el complejo, educar a un niño (Tabla I-2). Las ciudades manifiestan también esta complejidad, que está envuelta de incertidumbre en cualquier aproximación que se haga sobre ellas. Al igual que en el ejemplo planteado sobre la educación infantil, cada ciudad es única e irreproducible. La complejidad de las ciudades parece entonces obvia, sin embargo, ¿exhiben las ciudades auto-organización y comportamiento emergente? ¿tienen las ciudades propiedades fractales de auto-similitud?

Tabla I-2 Proceso simple, complicado y complejo

Seguir una receta	Enviar un cohete a la luna	Educar a un niño
La receta es esencial	La formulación es un aspecto crítico y necesario	La formulación tiene una aplicación limitada
Las recetas son sometidas a pruebas para asegurar una fácil reproducción del proceso	Enviar un cohete a la luna incrementa la seguridad de que el siguiente también llegará	Educar a un niño facilita experiencia pero no asegura el éxito del siguiente
No se requiere ningún conocimiento en particular, pero nociones previas incrementan el ratio de éxito	Altos niveles de conocimiento en una variedad de campos son necesarios para el éxito	El conocimiento puede contribuir pero tampoco es necesario ni suficiente para asegurar el éxito
Las recetas producen productos estandarizados	Los cohetes son similares en los aspectos críticos	Cada niño es único y debe ser entendido como un individuo
Las mejores recetas dan mejores resultados cada vez	No hay un alto grado de certidumbre para el resultado	La incertidumbre de los resultados es constante
Un enfoque optimista sobre posibles problemas	Un enfoque optimista sobre posibles problemas	Un enfoque optimista sobre posibles problemas

Fuente: Glouberman S. y Zimmerman, B. (2004)

Las propiedades fractales de las ciudades han sido ya estudiadas: Batty and Longley (1994); y Frankhauser (1994), demostraron fractalidad para el caso de la morfología de

la metrópolis de Londres y para Berlín respectivamente. Benguigui et al., (2000), sin embargo, realizando similares experimentos en Tel Aviv, mostraron como el grado de fractalidad morfométrica de la metrópolis variaba según su grado de desarrollo urbano. Sus conclusiones sugirieron que en la misma metrópolis existen diferentes partes que muestran sus propios tipos de desarrollo y que la dimensión fractal se incrementaba progresivamente a lo largo del tiempo, al mismo tiempo que se incrementaba la densidad urbana. No obstante, los estudios no concluyeron el motivo de que cada núcleo urbano analizado mostrara o no fractalidad, pero sí apuntaban a que la variación del índice fractal en la parte central estaba vinculada a su desarrollo urbano (comenzaba a expresar propiedades fractales a partir de 1985) (Benguigui et al., , 2000).

La fractalidad en las ciudades, observada como estructuras que se repiten a sí mismas a diferentes escalas o a partir de la jerarquía de relaciones entre distintas entidades urbanas, es una propiedad que si bien no ha sido totalmente explicada en profundidad, sí ha sido reconocida o detectada, al menos en base y con los matices de los mencionados trabajos. De cualquier modo, la organización fractal supuso una de las hipótesis que han impulsado, como los trabajos de Batty y Longley (1994), una base espacial y geométrica consistente, con el objetivo de apoyar el desarrollo de los modelos de simulación dinámica de las ciudades y la aproximación a las mismas como sistemas complejos. No en vano, un trabajo más reciente de Michael Batty (2007), *'Cities and Complexity: Understanding Cities with Cellular Automata, Agent-Based Models, and Fractals'* denota su giro para la integración de su enfoque fractal bajo el enfoque de las ciudades y la complejidad, donde da cuenta de los procesos 'de abajo a arriba' (bottom-up) que organizan las grandes áreas urbanas y de cómo los resultados alcanzan altos grados de incertidumbre, combinados con nuevas formas de geometría asociada con patrones fractales y dinámicas caóticas. Las ciudades se definen en esta obra como sofisticados sistemas complejos.

La auto-organización de las ciudades es una propiedad que no se muestra tan evidente como su complejidad, en el sentido de que su carácter artificial, creadas por el ser humano y cargadas de intencionalidad (más específicamente en las ciudades modernas), están eximidas de espontaneidad. Sin embargo, la ciudad surge y se desarrolla bajo un

cúmulo de decisiones colectivas, políticas, intervenciones, gobiernos, departamentos de planificación y administración, para satisfacer multitud de carencias y deseos. Esto precisamente es lo que ampliamente lleva implícito, en definitiva, un alto grado de auto-organización. La ciudad emerge de un cúmulo de interacciones que en este marco de combinaciones y decisiones, se crea a sí misma (White, Engelen y Uljee, *In Press*).

Por último, cabe mencionar en este apartado, un factor también considerado en la literatura y que también puede verse reflejado en las ciudades, aunque no se haga demasiado hincapié en ello, en las principales corrientes de las ciencias de la complejidad (O'Sullivan, 2004). Se trata de la dependencia histórica (*path dependence*), relacionada con la retroalimentación positiva (*positive feed-back*). Estos conceptos, tanto en su vertiente espacial y temporal, reflejan la importancia de la dependencia geográfica e histórica en la evolución, en este caso concreto, de las ciudades. Este hecho se muestra, cuando menos de manera implícita en muchos modelos dinámicos de cambio urbano, y se materializan sobre todo en el efecto de inercia (resistencia al cambio) que pueden darse en las localizaciones de distintas actividades dentro del sistema urbano (Arthur, 1994).

I.4.3.- La simulación del crecimiento de las ciudades como sistemas complejos a través de modelos basados en autómatas celulares

Adoptada la visión sobre la ciudad como un artefacto humano complejo en continua evolución, cuya complejidad y superestructura es el resultado acumulado de la interacción de elementos auto-organizados a través de reglas relativamente simples (White y Engelen, 1993), la cuestión que se plantea es: ¿cómo capturar este proceso de cambio en un modelo que nos permita entender y explicar esta dinámica?

Los modelos geográficos tradicionales, que se desarrollaron intensamente e impulsaron la corriente cuantitativa urbana, denominada 'ecología urbana', durante la década 1950-1960, como las teorías del lugar central, usos de suelo, distribución de las ciudades de acuerdo a su tamaño... (Portugali, 2011. p. 98), se enfocan sobre el crecimiento y la localización de las actividades en las ciudades y consisten en un conjunto de ecuaciones, cuyas variables representan la distribución espacial de valores demográficos o

económicos, y que además contienen parámetros que miden características tales, como la fricción de la distancia (White, 1989). Estos modelos, que aún hoy se desarrollan, son capaces de reproducir a través de las ecuaciones y parámetros los procesos dinámicos que representan. Sin embargo, no son igual de válidos para representar la auto-organización y los procesos emergentes relativos a los sistemas complejos, ya que en el transcurso de una representación temporal de un fenómeno espacial, se pueden producir cambios en la propia estructura de éste, o cambios en su comportamiento, que los modelos geográficos tradicionales no pueden fácilmente asumir. Estos modelos, generalmente basados en un estado de equilibrio, son capaces de explicar la expansión urbana, pero están limitados en su habilidad para simular la dinámica de los cambios que se producen en el comportamiento de las ciudades (Katoshevski-Cavari, 2007).

El reconocimiento de la complejidad de las áreas metropolitanas, en el contexto de los sistemas complejos, impulsará una inquietud científica expresada en la intención de entender y explicar la ciudad a través de modelos que simulan su comportamiento dinámico, no lineal y lejos del equilibrio. Donde su desarrollo se define a través de la interacción entre agentes dentro del propio sistema y de su relación con su entorno, caótico, pero donde se identifican patrones de funcionamiento, emergente en cuanto a su propiedad de auto-organización y capacidad adaptativa, y caracterizado por el cambio continuo.

Uno de los modelos más empleados para explicar y entender los sistemas complejos son aquellos basados en autómatas celulares. Su origen de aplicación generalmente es remitido al trabajo de Neuman a finales de la década de 1940, *'The Theory of Self-Reproducing Automata'* (Neuman, 1966), generado en su afán por replicar la lógica de los sistemas auto-reproducibles (ej. sistema nervioso, tejidos...), si bien estos fueron inicialmente teorizados por el físico Ulam (1952), y cuya definición se mantiene actualmente en esencia:

"Dada una malla regular de 'celdas infinitas', o gráfico de puntos, cada uno con un número finito de conexiones hacia sus 'celdas vecinas'. Cada punto es capaz de poseer un número finito de 'estados'. Los estados de las celdas vecinas en un tiempo t_n inducen, de una manera específica, el estado del punto en el tiempo t_{n+1} . Esta regla de transición

se ajusta de modo determinista, o bien, de un modo más general, podría contener decisiones de tipo aleatorio".

Uno puede definir ahora de manera aproximada subsistemas finitos llamados 'autómatas u organismos'. Estarán caracterizados por una secuencia periódica, o casi periódica de sus estados en función del tiempo y por la siguiente característica 'espacial': el estado de los elementos del organismo; el organismo puede, de manera inversa, tener influencia con todos los estados de los puntos vecinos, los cuales no forman parte de otros organismos." (Ulam, 1952).

El desarrollo de estos modelos ha sido constante, siendo uno de los hitos el paso dado por el científico Stephen Wolfram (1984), que en su esfuerzo por encontrar las conexiones entre computación y la naturaleza recaba en los autómatas celulares, como un modelo matemático para simular el comportamiento de los sistemas naturales complejos y adaptativos. De este modo a través de la prestigiosa revista *Nature*, afirmó y mostró como:

"Los sistemas naturales, desde los copos de nieve hasta las conchas de los moluscos muestran una gran diversidad de patrones complejos. El origen de tal complejidad puede ser investigado a través de modelos matemáticos, denominados 'autómatas celulares'. Los autómatas celulares están compuestos por un conjunto de elementos idénticos, cada uno simple, pero juntos capaz de desarrollar comportamientos complejos. Son analizados ambos como sistemas dinámicos discretos, y como sistemas de procesamiento de información..." (Wolfram, 1984).

Como ya se ha mencionado, las Ciencias Sociales, y más específicamente la Geografía, en el tratamiento de sus objetos de estudio, no se demoran en la incorporación, tanto de las nuevas perspectivas aportadas por las teorías de la complejidad, como en el desarrollo de la aplicación de modelos basados en autómatas celulares para la comprensión y la explicación de fenómenos de carácter social y geográfico. En este sentido, y para continuar apuntando hitos, debe señalarse la figura del geógrafo Waldo Tobler, popularmente conocido por enunciar, o más bien invocar a *la primera ley en Geografía*: *"todo está relacionado con todo lo demás, pero las cosas cercanas están*

más relacionadas que las cosas más distantes" (Tobler, 1970). Tobler señala en *"Cellular Geography"* (Tobler, 1979), las posibilidades de un modelo geográfico dinámico y celular, basado en una serie de reglas simples de interacción espacial entre sus componentes (células) en un rango de vecindad dado. La vecindad, expresada como una relación entre cada elemento con los elementos de su entorno, los cuales pueden influenciar los estados de aquel (véase arriba, Ulam, 1952), es en esencia geográfica. De esta manera, no es peregrino que Tobler (1979), tras presentar una serie de modelos básicos para determinar el estado de un elemento en el espacio haya denominado a éste, 'modelo geográfico' (Tabla I-3).

Tobler (1979) clasifica los modelos que podrían determinar el uso de suelo de una localización representada por una celda de una tesela rectangular y uniforme: 1) El modelo independiente, en el que el uso de suelo de esa determinada localización en el espacio presenta aleatoriedad y no tiene ninguna relación con el uso de suelo de esa localización en un tiempo anterior; 2) El modelo dependiente funcional, en el que el uso de suelo de una localización depende del uso de suelo en un tiempo anterior, de esa misma localización; 3) El modelo histórico, donde el uso de suelo de dicha localización tiene que ver con los usos de suelo de esa misma localización observada en varios estadios temporales anteriores; 4) El modelo multivariable, en el que el uso de suelo de esa localización está relacionado con otras propiedades de esa misma localización; y 5) El mencionado modelo geográfico, donde el uso de suelo de esa celda localizada está en relación con el uso de suelo de las celdas localizadas en un determinado radio de distancia o vecindad. Este último es el modelo que define en esencia el autómata celular.

El texto de Tobler (1979) fue extremadamente sugerente *-quizá por su sencillez-* para el desarrollo de los modelos geográficos basados en autómatas celulares. Su idea de tratar el espacio geográfico como una abstracción en forma de una matriz cuadrada de celdas homogéneas que contienen información sobre su estado, no era nueva, su uso ya se extendía con el desarrollo de los Sistemas de Información Geográfica (SIG). Sin embargo, la expresión de un esbozo de modelo dinámico geográfico y celular, para explicar el comportamiento de los cambios de uso de suelo por influencia de suelo de un segmento de una región, cautivó la atención de la investigación en el desarrollo de este tipo de modelos. Utilizando de manera análoga el juego del ajedrez sería como si se

tuvieran los fotogramas del tablero con la posición de las piezas tras cada movimiento de los jugadores. A través de la observación de estos fotogramas consecutivos con la posición de las piezas en el tablero podrían deducirse las reglas que rigen los movimientos de cada pieza: *'Las reglas del ajedrez son bastante simples, pero el juego, que implica el uso de estas reglas dentro de una estrategia, es complejo'* (Tobler, 1979).

Tabla I-3 Clasificación básica de modelos de cambio de usos de suelo

I. El modelo independiente		<p>$g_{ij}^{t+\Delta t}$ es una variable aleatoria y no tiene ninguna relación con g_{ij}^t</p>
II. El modelo dependiente funcional		<p>El uso de suelo en la localización ij y el tiempo $t + \Delta t$, depende del uso de suelo anterior en la misma localización: $g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{ij}^t)$</p>
III. El modelo histórico		<p>El uso de suelo en la localización ij y el tiempo $t + \Delta t$, depende de diferentes usos de suelo anteriores en la misma localización: $g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{ij}^t, g_{ij}^{t+\Delta t}, g_{ij}^{t+2\Delta t}, g_{ij}^{t+3\Delta t}, \dots, g_{ij}^{k+\Delta t})$</p>
IV. El modelo multivariable		<p>El uso de suelo en la localización ij y el tiempo $t + \Delta t$, depende de otras variables situadas en la misma localización: $g_{ij}^{t+\Delta t} = F(u_{ij}^t, v_{ij}^t, w_{ij}^t, \dots, z_{ij}^t)$</p>
V. El modelo geográfico		<p>El uso de suelo en la localización ij y el tiempo $t + \Delta t$, depende de los usos de suelo de otras localizaciones vecinas: $g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{i\pm p, j\pm q}^t)$</p>

Fuente: Adaptado de Tobler (1979)

En el mencionado modelo geográfico, la configuración de los usos de suelo de una región está representada a través de una rejilla bidimensional uniforme de celdas o células. Cada una de las células tiene una posición i, j , y además representa un estado g_{ij} (uso del suelo), que entre un periodo temporal, $t - \Delta t$ puede mutar por la influencia del estado de sus células vecinas, n_{ij} (vecindad), y lo hace por medio de una regla simple de

transición, F . De este modo la dinámica de cambio de estado de uso de suelo para cada celda vendría dada por :

$$g_{ij}^{t+\Delta t} = F(g_{ij}^t, n_{ij}^t)$$

Ecuación I-1.- Función de transición de Tobler (1979)

Después de las ideas de Tobler (1979) se suceden multitud de trabajos en esta dirección, como los de Phipps (1989,1992) quien centra sus enfoques en la construcción de clusters, y Couclelis (1985, 1988, 1989), que en sus primeros trabajos trata de explorar cuestiones teóricas sobre cómo acercarse a estructuras complejas a través de una óptica espacial (White & Engelen, 2000). Posteriores estudios tratan de resolver problemas referentes a la representación de sistemas geográficos a partir de autómatas celulares (Cecchini, 1996; Papini and Rabino, 1997).

El gran salto cualitativo en el campo de los MDUAC aplicados a las dinámicas territoriales, se produce cuando se persigue el objetivo de insertar el modelo dentro de aplicaciones basadas en SIG. Este objetivo atrae cierta atención en el campo y da lugar a aplicaciones como SAGE (grid-based GIS) desarrollada por Itami, R. (1994). Prototipos como SimLand (Wu,1998; Wu y Webster, 1998) combinando el uso de SIG (ARC/INFO), autómatas celulares y métodos de evaluación multicriterio consiguen resultados bastante reales sobre las normas de transición dentro de un sistema de usos de suelo urbano. Wagner (1997), observando las deficiencias de los SIG de ese momento, elabora también un método para implementar conjuntamente las dos plataformas (SIG y MDUAC).

La combinación o el trabajo integrado entre los MDUAC y los modelos de SIG, impulsa de manera notable la aplicación de éstos a casos concretos de estudio. Este hecho orienta la investigación hacia el cuestionamiento de la utilidad de los MDUAC para resolver problemas prácticos, que rebasando el plano teórico del funcionamiento de los sistemas que tratan de representar los modelos, puedan servir de apoyo en facetas como las políticas de planificación socio-territorial, evaluaciones de impacto ambiental o toma de decisiones de marcado carácter espacial. En general, los MDUAC desarrollados

cuentan con una serie de elementos comunes y otras características que pueden modificarse (Tabla I-4).

Tabla I-4 Elementos de un MDUAC

Elementos constantes	Elementos Variables
-Representación del sistema espacial en un grid (rejilla) compuesto por células rectangulares de igual tamaño	-Escala-resolución (tamaño de las celdas de la rejilla)
-Coberturas de estados de células para al menos dos momentos temporales discretos	-Número de estados definidos para las células
-Definición mínima de dos estados para las células	-Número de coberturas de estado de las células en diferentes momentos temporales
-Una serie de reglas de transición que determinan el estado de la célula en función de su entorno	-Distancia y número de células que conforman la vecindad (entorno) para el cálculo de la transición
-Evolución de las células en una secuencia de pasos discretos donde todo el sistema se actualiza al mismo tiempo	-Periodo temporal para la actualización espontánea de los estados celulares (en usos de suelo suele utilizarse 1 año)

Fuente: White et al., . (1997)

Los casos de aplicación práctica de los modelos basados en MDUAC y SIG se desarrollan principalmente en áreas de gran desarrollo urbano, como el caso de Buffalo, E.E.U.U. (Batty y Xie, 1994; Batty et al., , 1996); San Francisco Bay (Clarke et al., , 1997) y el posterior estudio comparativo entre Whashington-Baltimore y San Francisco Bay (Clarke & Gaydos, 1998); las ciudades de Lisboa y Oporto, adaptando el modelo de Clarke a las características endógenas de estas ciudades europeas (Silva & Clarke, 2002), este modelo denominado SLEUTH, continuó ampliamente su desarrollo (Clarke, 2007); la ciudad China de Zongshan fue también simulada, donde también se añaden al modelo técnicas de evaluación multicriterio (Zhongwei, 2003); la ciudad de Lagos en Nigeria, con las singularidades propias de estas aglomeraciones urbanas de países en vías de desarrollo que han experimentado bruscos e ingentes crecimientos de población en un corto espacio de tiempo (Barredo, 2004).

Engelen et al., (1995), presentaron una nueva línea de trabajo basada en la generación de un conjunto de técnicas aplicadas para la realización de modelos dinámicos que sirvieran de apoyo a las decisiones, integrando factores socioeconómicos y ambientales en diferentes escalas de análisis. La aplicación de este conjunto de técnicas ha sido desarrollada y aplicada de manera pionera por White y Engelen (2000) con muy buenos

resultados sobre los Países Bajos. Esta línea de trabajo ha seguido desarrollándose hasta la actualidad, encabezada por investigadores de RIKS (Research Institute of Knowledge Systems) en los Países Bajos, donde se ha generado una aplicación informática, METRONAMICA, que puede implementar un modelo de cálculo de demanda suelo a macroescala y un modelo dinámico a escala local basado en autómatas celulares, para la localización de los cambios de usos de suelo. Ambos modelos interactúan de manera integrada. El sistema sirve para apoyar decisiones relacionadas con políticas públicas que han sido formuladas en respuesta a los efectos del cambio climático.

Las técnicas para simulación del cambio de usos y cobertura del suelo basadas en autómatas celulares, tal y como se ha mostrado, desde su aparición han seguido desarrollándose dentro del campo de los modelos geográficos, sobre todo en los enfoques que integran los cambios de usos de suelo (más intensamente los de tipo urbano) como eje central de las explicaciones.

El desarrollo y aplicación de los MDUAC, avalan su éxito en la explicación de problemas espaciales, demostrando cuando menos, su atractivo para la investigación en cuanto a que como técnica no ofrece dificultad en exceso. Este hecho, es también un aspecto a destacar, ya que desde el punto de vista pedagógico, aún cuando los modelos no encuentran una aplicación útil de gestión a problemas, ej. planeamiento urbano, su utilidad como herramienta explicativa lo dotan de un valor excepcional, en cuanto a su capacidad para entender, a través de la simulación, artefactos complejos, que como la ciudad, evolucionan de manera anisotrópica³ y no estacionaria⁴.

I.5.- PRESENTACIÓN DEL ÁREA GEOGRÁFICA DE ESTUDIO

I.5.1.- Una región heterogénea

La Comunidad de Madrid (C.M.) ocupa una posición central no sólo en términos estrictamente geográficos en la Península Ibérica, sino también como polo de desarrollo

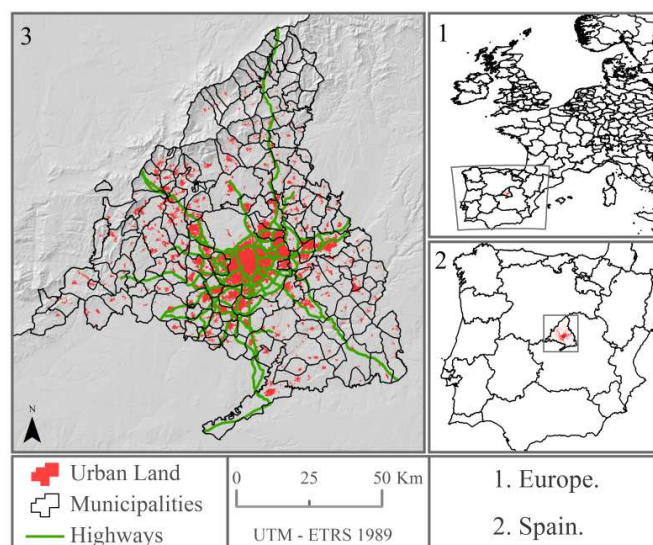
³ Anisotrópica: la variación espacial es diferente de acuerdo a las direcciones de avance en el espacio observadas desde un punto concreto (Gallardo, 2006).

⁴ No espacialmente estacionario: No se manifiesta el mismo grado de variación en el espacio para una variable dada (Gallardo, 2006).

económico y concentración de población en Europa (Figura I-1). En 2009, contaba ya con 6.386.932 habitantes de los cuales el 90 % pertenece a los 27 municipios que conforman la que oficialmente fue denominada en 1963 área metropolitana de Madrid. Actualmente (2014) esta delimitación oficial no existe y territorialmente, el conjunto de estos 27 municipios (frente a los 179 que componen la C.M.) no es suficiente para explicar las transformaciones metropolitanas que tienen lugar en esta región administrativa, y de hecho algunos autores afirman que el área metropolitana desborda claramente los límites políticos de la comunidad autónoma, extendiendo su influencia hacia las provincias de Guadalajara y Toledo, y con menor intensidad Segovia, Ávila y Cuenca (López de Lucio, 2003; Solís, 2008).

La C.M., en términos estrictamente poblaciones y urbanos representa un buen ejemplo del fenómeno que se suele denominar 'macrocefalia urbana', a través del cual se manifiesta un gran desequilibrio espacial en la ocupación del territorio, dónde una región "central" concentra gran cantidad de efectivos poblaciones poblacionales y actividad urbana, y en torno a ella se organizan las redes de transporte y las comunicaciones, definiendo una jerarquía de ciudades encabezada por una gran ciudad 'central'. En este caso de estudio, el municipio de Madrid, mantendría esta posición acumulando casi el 50% de la población total de la Comunidad Autónoma.

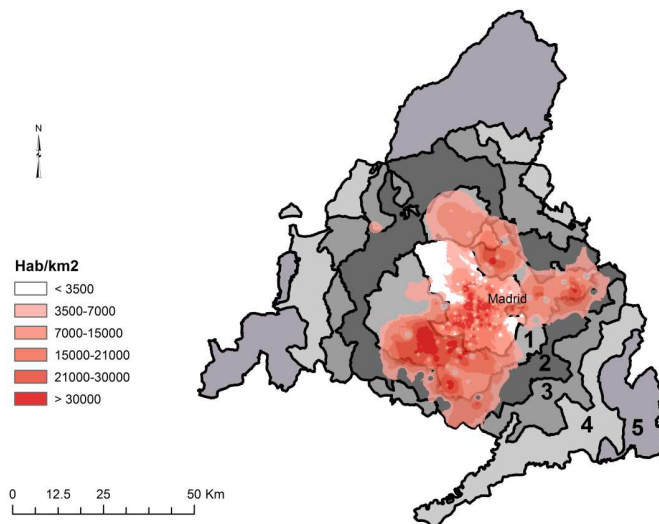
Figura I-1 Localización del Comunidad de Madrid



Fuente: Elaboración propia a partir de IDEE y MLU

Sin embargo, el mencionado desequilibrio en la ocupación urbana de la C.M. de claro gradiente centro periferia, no define en su totalidad, la extensa heterogeneidad geográfica que exhibe esta región, tanto en sus aspectos físicos y ambientales, como en aquellos que de carácter socio-económico. En este sentido, la observación espacial de la C.M., se puede precisar en multitud de regiones dependiendo del dinamismo de transformación de los usos de suelo, los conglomerados de actividades, las densidades de población, diferencias de accesibilidad, densidad de espacios naturales, proporción de suelo urbano, patrones de desarrollo, etc. Por este hecho, dependiendo del enfoque dimensional que se esté tratando (demográfico, económico, ambiental, social, geográfico...) o del vector concreto de trabajo (usos de suelo, transporte, poblamiento, salud, renta, productividad, empleo, administrativo...), el territorio de la C.M. se suele agrupar para su estudio en áreas más o menos homogéneas que integran municipios de características similares en cuanto al enfoque dimensional o vector tratado, pudiendo a veces combinar varias perspectivas. Este hecho constituye una muestra de la mencionada heterogeneidad territorial de la C.M.

Figura I-2 Densidad de población y coronas metropolitanas



Fuente: INE 2009 (análisis kernel centroides municipales)

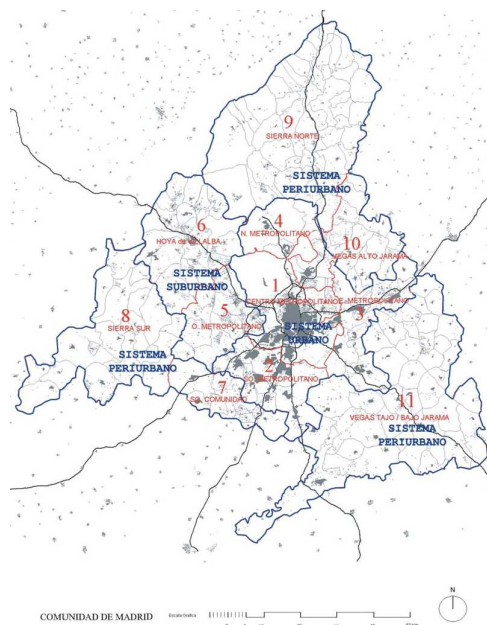
Para mostrar algunos ejemplos de estos esfuerzos de agrupación en regiones de estudio de la C.M., véase la división de la región en 5 anillos (coronas metropolitanas) que reúnen distintos municipios y corresponde de manera general a una relación de

proximidad al municipio de Madrid, núcleo de mayor concentración demográfica del área metropolitana (García Palomares, 2007). La distancia aproximada de los límites de cada corona es de 10 kilómetros y su interés estriba en que corresponde con bastante exactitud al efecto de disminución de las densidades de población con la distancia al núcleo, que en este caso correspondería con el municipio de Madrid. Esta agrupación de municipios, resulta útil para los estudios sobre procesos de sub-urbanización inicial y enfoques sobre la peri-urbanización y difusión del tejido urbano (Figura I-2).

También hay casos concretos para la C.M., de agrupación de municipios en regiones empleada para el análisis de las transformaciones del territorio, como el utilizado por López de Lucio (2003), que divide el territorio en tres sistemas (urbano, suburbano, periurbano) y a su vez cada uno de estos en 11 zonas relacionadas con entidades comarcales (Figura I-3).

Enfoques más orientados al transporte han considerado oportuna la división de la C.M. en tres grandes zonas perimetrales (Figura I-4), Madrid (municipio), corona metropolitana y municipios no metropolitanos, dividiendo la corona a su vez en cuatro sectores (norte, sur, este, oeste).

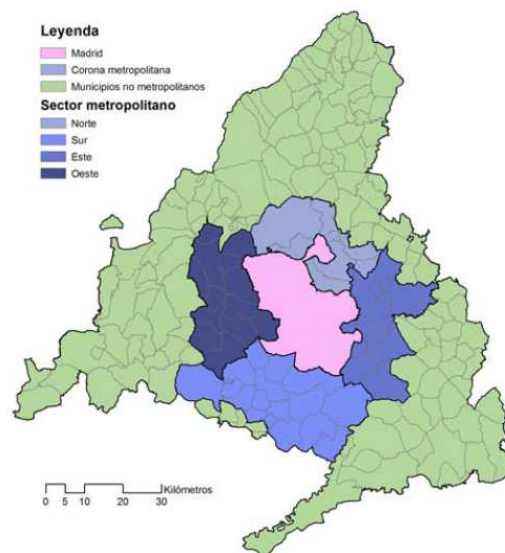
Figura I-3 División de la Comunidad de Madrid en Sistemas Urbanos



Fuente: López de Lucio, 2003

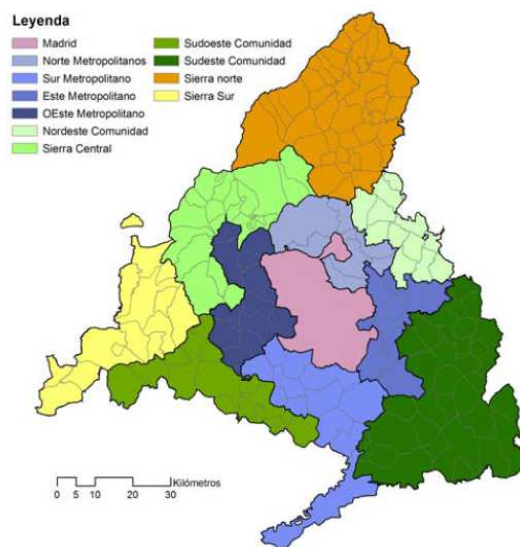
Otros ejemplos de agrupación, responden a la organización de datos estadísticos, como aquellos que se refieren a la agregación de los datos que proporciona una fuente oficial, como es el caso de los NUTS de la Unión Europea, que también utiliza el Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid (Figura I-5).

Figura I-4 Agrupaciones de la C.M. regiones relativas a la gestión del transporte



Fuente: García Palomares, 2007

Figura I-5 División en NUTS de la Comunidad de Madrid



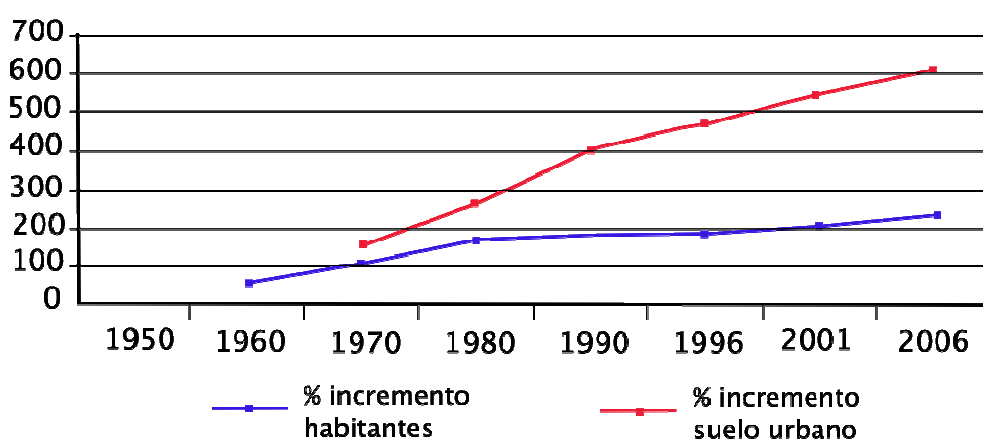
Fuente: García Palomares, 2007

I.5.2.- Un espacio de continua expansión urbana

La C.M. desde una perspectiva global, tanto en términos demográficos como en cuanto a la evolución del tejido urbano ha mantenido altas tasas de crecimiento continuado a partir de la primera mitad del siglo XX, presentando algunos periodos de ralentización o estancamientos, generalmente correspondientes a periodos de crisis económica. Sin embargo, una cuestión a destacar, es que el porcentaje de crecimiento del espacio urbano aumenta muy por encima de las tasas de crecimiento poblacional, lo que supone un desacople del desarrollo cuantificable de estos dos fenómenos. De hecho en periodos en los que la población presenta uno de estos estancamientos de crecimiento, como entre 1991 y 1996, la ocupación de suelo continuó su ascenso permanente (Figura I-6).

La ocupación de suelo ha pasado de 11.850 ha. en 1956 a 83.982 ha. en 2005, lo que supone un aumento de 7 veces en aproximadamente 50 años, sobre la ocupación inicial y un incremento anual del suelo urbano de unas 1.300 ha (C.M., 2009). Si se supone un crecimiento continuo uniforme, la superficie urbana de la C.M. aumentó unas 13.000 ha. (unos 6.500 campos de fútbol) cada 10 años, entre 1956 y 2005.

Figura I-6 Crecimiento de la población y de la ocupación del suelo. 1950-2005



Fuente: C.M. Consejería de Medio Ambiente, Vivienda y Ordenación del Territorio

La información suministrada por el extinto Observatorio de la Sostenibilidad en España (OSE, 2006) señala un alto crecimiento del suelo artificial para este periodo en todas

las Comunidades Autónomas españolas (Tabla I-5). La Comunidad de Madrid presentaba entre 1987 y 2000 de 30.922,6 ha una de las tasas más alta de crecimiento anual para este periodo (0,0305), siendo la tercera más alta de España, después de Murcia y la Comunidad Valenciana. Estos datos dan cuenta del alto dinamismo de la región madrileña en cuanto al fenómeno de ocupación de suelo, respecto al resto de Comunidades Autónomas del país.

Tabla I-5 Crecimiento anual de suelo artificial (ha) por CCAA 1987-2000.

Comunidad Autónoma	Tasa Crecimiento		
	1987	2000	Anual
Murcia (Región de)	22591.8	36596.2	0.0378
Comunidad Valenciana	76652.7	116601.1	0.0328
Madrid (Comunidad de)	64810.0	95732.6	0.0305
Navarra (Comunidad Foral de)	8452.3	12365.6	0.0297
Baleares (Illes)	22048.8	31179.1	0.0270
Castilla y León	89008.9	118424.3	0.0222
Castilla-La Mancha	59144.6	78116.0	0.0216
Extremadura	23307.3	30477.8	0.0208
Andalucía	136920.9	175375.2	0.0192
Asturias (Principado de)	17134.3	21435.5	0.0174
Cantabria	12113.0	14795.2	0.0155
Aragón	35900.5	43647.1	0.0151
Galicia	45018.7	53997.8	0.0141
País Vasco	23607.8	26891.2	0.0101
Rioja (La)	6294.3	7126.7	0.0096
Canarias	31324.5	33961.5	0.0062
Cataluña*	sin datos	sin datos	sin datos

Fuente: Observatorio de la Sostenibilidad de España. CORINE Land Cover

I.5.3.- La dinámica de cambio de usos de suelo urbano en Madrid

El dinamismo de Madrid, ha sido una cualidad indiscutible y patente en los últimos 50 años. El crecimiento ha sido una pauta continua, observado a través de indicadores demográficos, sociales, culturales, económicos, tecnológicos y espaciales (expansión urbana, distribución de usos de suelo, oscilación de las distancias medidas en tiempo). Este hecho de cambio gradual ha contribuido a la capacidad de esta región para generar y adaptarse a cambios continuos que cada vez se producen a ritmos más acelerados. Los complejos procesos de expansión urbana son una consecuencia directa de estos cambios

y terminan manifestándose de manera directa en una dinámica compleja de ocupación urbana del suelo.

La dinámica de usos de suelo de la C.M. es el resultado de las adaptaciones del espacio regional frente a diferentes circunstancias e inercias socio-económicas, muchas veces globales, y/o generadas por fenómenos exógenos, pero que en última instancia tienen incidencia local. Su observación permite entonces reconocer en cierta medida las orientaciones que están determinando el modo en que se desarrolla la región.

El modelo actual de urbanización de la región de Madrid ha sido calificado ya de tipo insostenible desde el punto de vista ambiental, social y económico en documentos elaborados por la Unión Europea (Gutiérrez Puebla, 2003. p. 34). En esta línea, se afirma que la ciudad compacta tradicional se ha transformado en un espacio metropolitano cada vez más discontinuo, disperso y fragmentado (García Palomares y Gutiérrez Puebla, 2007).

López de Lucio (2003) ha afirmado que el modelo territorial de la C.M. ha producido un relativo deterioro y vaciado de partes significativas de los tejidos urbanos en los núcleos tradicionales; una creciente especialización y segregación física, social y económica de las actividades (baja densidad y diversidad de usos de suelo); un vertiginoso ascenso de los desplazamientos en vehículos privados motorizados con sus dos vertientes de efecto sobre la desigualdad socio-económica en la movilidad (posibilidades de acceso al vehículo privado) y las negativas consecuencias medioambientales; así como la dificultad para la distribución de servicios públicos a la población y la crisis de actividades comerciales de proximidad.

Para la región de Madrid, se indica de manera aceptada que el crecimiento del tejido urbano, al menos de los últimos 20 años (1991-2010), se instala con mayor intensidad en los espacios denominados periféricos, suburbanos y periurbanos (Gutiérrez Puebla, 2003, pp. 37-48). Así lo afirma también López de Lucio (2003), señalando que los municipios más dinámicos son aquellos de la orla periférica del área metropolitana, del mismo modo que García Palomares (2007) se refiere a *esa metrópoli difusa que se está extendiendo a través de unas nuevas periferias de carácter disperso y fragmentado*. En

los años sesenta y setenta la extensión urbana por los desarrollos urbanos que excedían el límite de la "ciudad compacta" ya había sido considerada como *urbanización periférica*, pero en este caso la pauta continuaba siendo la continuidad del tejido urbano manteniendo cierta densidad y de carácter concentrado, frente al patrón generalizado de crecimiento de los últimos 20 años (1991-2010), señalado como disperso, discontinuo y fragmentado (García Palomares, 2007).

I.5.4.- Sprawl. La dispersión de los usos residenciales.

La región de Madrid ha sido ya catalogada en cuanto al desarrollo urbano como uno de los puntos calientes (*hot-spots*) de la Unión Europea en cuanto al fenómeno urbano *sprawl* (EEA, 2006). *Hoy Madrid es una región de expansión descontrolada (sprawled), un proceso que ha ocurrido dentro del contexto de un marco de planificación espacial débil* (Munoz, 2003; López de Lucio, 2003; Fernández-Galiano, 2006).

Una definición común de *sprawl* es la dada por Ewing (1994;1997), que con un matiz orientado a la ciudad anglosajona sugiere cinco principales características generales para determinarlo, que pueden ser extensibles a los procesos experimentados en la región de Madrid:

1. Un patrón disperso y discontinuo de desarrollo, el cual deja espacios vacíos entre las zonas ocupadas por usos de suelo edificatorios.
2. Desarrollo de áreas residenciales de baja densidad, las cuales crean extensas ocupaciones de suelo para viviendas unifamiliares con sus propios patios privados y con ausencia de servicios públicos.
3. Polígonos comerciales desarrollados a lo largo de los principales ejes de transporte.
4. Segregación de usos de suelo, en los cuales las áreas residenciales se encuentran separadas de otros usos de suelo urbano eliminando las funciones propias de la ciudad de cada una de ellas.
5. Baja accesibilidad y alta dependencia del vehículo privado, principalmente debido a la segregación de usos de suelo, pero también a la estructura vial.

Este tipo de modo expansivo de cierto descontrol o planificación laxa (Plata Rocha et al., 2008), impulsado por diversas causas entre las que se suele destacar una planificación débil o mercantilista del suelo en gran parte orientada al negocio inmobiliario entre otros factores activos, conlleva consecuencias como la congestión del tráfico, incrementos del consumo de energía y una planificación costosa de los servicios públicos ciudadanos (Martinuzzi et al., 2007) así como un importante consumo directo de suelo.

Tanto en documentos institucionales (EEA, 2006), como en textos científicos (Gutiérrez Puebla, 2003; Geerken, 2007; García Palomares, 2010), se señalan los nuevos desarrollos de Madrid por acumular las características propias del *sprawl*. Así, en torno a las principales vías de comunicación se han creado nuevos paisajes residenciales donde predominan las urbanizaciones de viviendas unifamiliares asociados o alternando con grandes centros comerciales (*malls*) y otros espacios de actividad, se trata de *auténticas islas residenciales, conectadas a las infraestructuras y ancladas a ellas, pero separadas entre sí física y socialmente* (García Palomares, 2007).

Si bien es cierto que en las regiones mediterráneas no encajan propiamente las estructuras que definen el *sprawl* americano, García Palomares (2007) señala que tanto el modelo de suburbanización anglosajón como el mediterráneo parecen haberse encontrado en la definición de lo que en Europa se ha dado en llamar la ciudad difusa. Una de las características comunes del fenómeno es la homogeneización del espacio por el uso residencial de baja densidad, a veces para el caso de Madrid de tipo multifamiliar (unidades de edificación residencial que albergan más de una unidad habitacional), pero generalmente de poca altura y generando altos ratios de ocupación horizontal por número de efectivos poblacionales residentes.

En definitiva el *sprawl* observado en la C.M. muestra un marcado carácter residencial, aunque generalmente engloba otros usos de suelo como la gran superficie comercial concentrada, amplias zonas verdes y equipamientos (generalmente de carácter privado). Las dinámicas de expansión urbana relacionadas revelan un proceso de alta ocupación de espacio, generado a saltos (*leapfrog*) y caracterizado por la existencia de extensas áreas residenciales de densidad media-baja, a las que se accede por un entramado de

vías rápidas de comunicación (anillos, autopistas o autovías) pero no necesariamente accesibles (distancia a destinos de trabajo, estudio, ocio...), que además presentan cierto aislamiento respecto de otros núcleos urbanos tradicionales consolidados (con mayor diversidad de usos de suelo).

Por último, este fenómeno también genera la "atracción" de otros usos de suelo hacia los vacíos generados por las estructuras residenciales de baja densidad y las grandes infraestructuras de transporte. De este modo, se termina de definir un espacio marcado por este tipo de dinámica urbana expansiva, con la incorporación de grandes espacios periféricos y especializados, que concentran algún tipo de actividad (grandes centros comerciales, ciudades de negocio, parques empresariales...). Todo dentro del mismo marco de "dispersión-concentración" de las actividades.

I.5.5.- La descentralización concentrada de los nuevos espacios de producción y servicios.

La transformación de las áreas urbano-metropolitanas se encuentra hoy ampliamente concretada en un orden jurídico y jerárquico territorial que se refleja en última instancia, para el caso del territorio español, en planes de ordenación regional y planes de ordenación municipal. Estas figuras de ordenación fueron demandadas ya en el conocido manifiesto denominado Carta de Atenas del arquitecto Le Corbusier presentada en el IV Congreso Internacional de Arquitectura Moderna (CIAM) en 1933 y posteriormente publicada por él mismo (Le Corbusier, 1942).

La mencionada obra de Le Corbusier recoge un manifiesto que ha tenido gran influencia en la ordenación de la ciudad, como lo es la diversificación funcional de los usos de suelo. Una medida que pretendiendo poner orden a situaciones de insalubridad y mala calidad de vida que estaba amenazando el modo de vida urbano de las ciudades industriales. No obstante, la diversificación funcional de los usos de suelo en la ciudad, que generalmente desplazó los procesos de producción industrial fuera de su radio tradicional, parecen no haber terminado con la expulsión de las actividades *insalubres* de los espacios residenciales. Tal y como se observa hoy en muchas estructuras metropolitanas, las actividades productivas y de servicios parecen haber continuado

este mismo proceso de *expulsión* de la ciudad hacia la periferia, alimentando el mencionado modelo de concentración dispersa de las actividades urbanas.

Las intenciones de Le Corbusier en su manifiesto tuvieron una repercusión positiva, para la escala de aplicación y el contexto histórico-cultural en el momento en que éste fue redactado. De este modo, en su afirmación: *"El simple plan municipal será reemplazado por un plan regional. El límite de la aglomeración será función del radio de su acción económica"*. (Le Corbusier, 1942), el arquitecto considerado el creador de los principios del urbanismo moderno (Schnitter, 2003), quizá no contaba con la extensión que podría adquirir el radio de acción económico de un área metropolitana, o por el contrario su visión de un área regional multilobulada con ciudades de usos de suelo diversificados interrelacionadas entre sí, no tuvo lugar exactamente de la manera que el mismo describió.

"Podrán decidirse asignaciones, restricciones y compensaciones que atribuirán a cada ciudad, rodeada de su región, un carácter y un destino propios. Así, cada una ocupará un lugar y un rango en la economía general del país" (Le Corbusier, 1942)

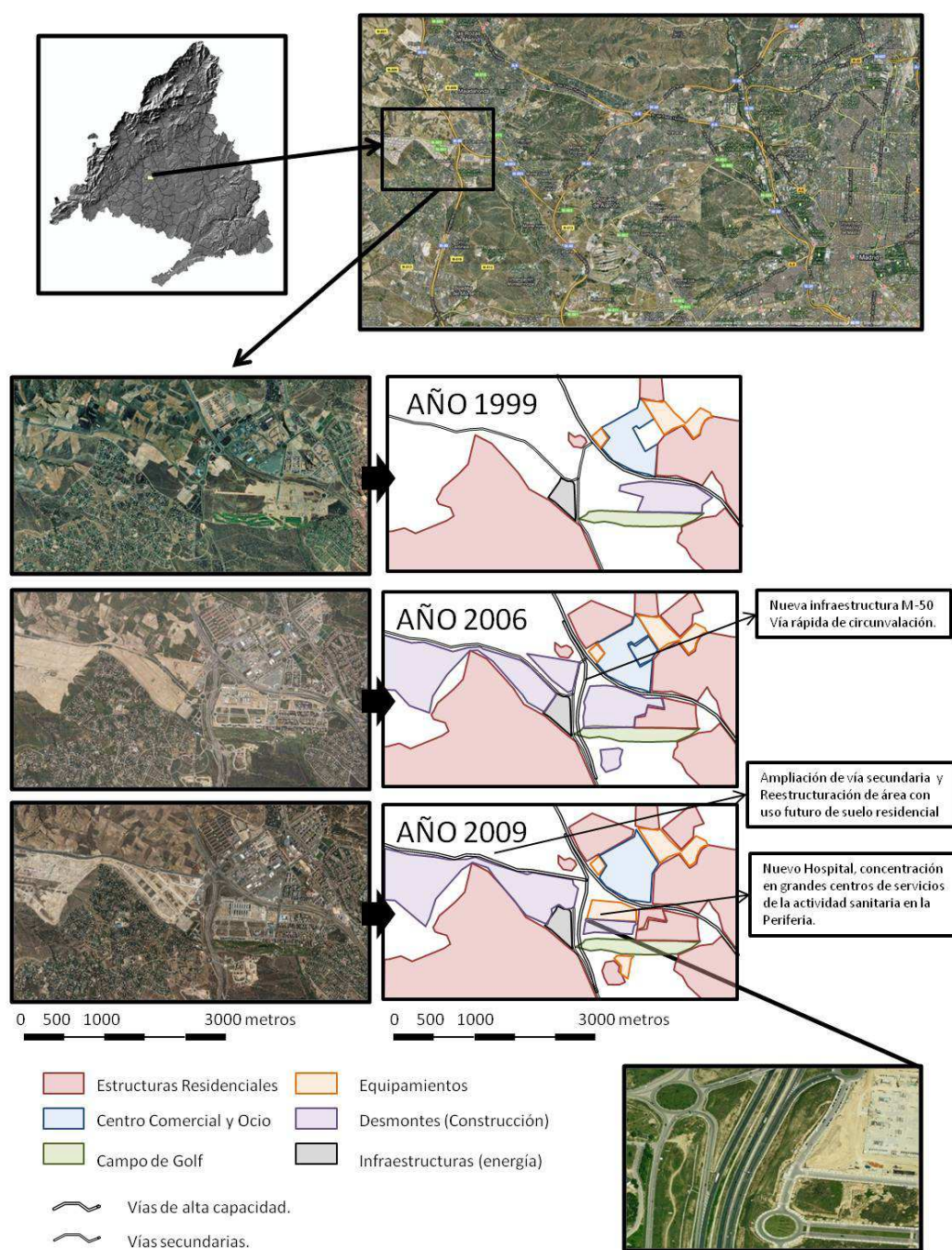
La diversificación funcional de los usos de suelo y su evolución hacia este *estatus* continua produciéndose y así puede observarse en la C.M., aunque posiblemente no a la escala que reclamaba la Carta de Atenas para la ciudad, y esta es la escala humana. De este modo los nuevos desarrollos urbanos, las dinámicas de ocupación de grandes cantidades de suelo y los nuevos espacios urbanos de actividad productiva se están generando en las denominadas periferias urbanas. La fragmentación, dispersión, discontinuidad y gran expansión del espacio urbano (García Palomares y Gutiérrez Puebla, 2007) está también ligada a los centros de trabajo, los parques logísticos y empresariales, la actividad comercial y de ocio concentrada e incluso los servicios públicos que se han sumado ya a esta dinámica espacial. Existe diversidad de usos de suelo y además diversidad funcional de los mismos, pero todo se desarrolla a la escala de los medios de transporte mecanizados, y de ahí el gran papel que están jugando las infraestructuras en la posibilitación de este sistema de usos de suelo de gran especialización mono-funcional interconectados entre sí.

Los espacios de concentración industrial, las ciudades empresariales periféricas de las nuevas sedes de grandes firmas, los parques tecnológicos, los grandes centros logísticos, la nueva concepción concentrada en espacios privados de comercio y ocio, las grandes estructuras de servicios públicos al ciudadano (grandes hospitales, universidades...) y grandes espacios residenciales. Toda una serie de elementos mono-funcionales que están surgiendo en las periferias urbanas y que además producen fenómenos de atracción entre sí, por ejemplo parques empresariales que atraen centros comerciales y estos a su vez incentivan la ocupación del suelo por espacios residenciales planificados.

La nueva concepción del comercio y el ocio urbano reflejada en la concentración de centros comerciales periféricos alimentan la denominada ciudad dispersa, convirtiéndose en pieza clave de estos complejos desarrollos suburbanos, contribuyendo a la desaparición de las diferencias entre el centro tradicional y la periferia, al trasladar o dispersar y al mismo tiempo concentrar las funciones de consumo y ocio a espacios cada vez más periurbanos (Escudero, 2008. p. 213). En definitiva, la descentralización comercial acompaña a la propia descentralización de las actividades de los centros compactos tradicionales contribuyendo a la ruptura del modelo urbano continuo de las áreas urbanas (Díaz-Pacheco y Hewitt, 2010). Los centros comerciales periféricos, a la vez que se relacionan con el resto del tejido urbano casi exclusivamente por medio de la red metropolitana de autovías y autopistas (López Lucio, 2011), también se encuentran insertos dentro de un marco de actuaciones urbanas en los que el centro comercial es incorporado por los agentes de planificación como elemento de alto valor de atracción de población (Dávila, 2005, citado en Escudero, 2008. p.211).

Los servicios públicos siguen la dinámica de la actividad privada, esto se identifica bastante bien en la Comunidad de Madrid con el desarrollo concentrado de amplios espacios dedicados a la actividad formativa (ciudades universitarias y grandes centros privados de formación). Del mismo modo enormes centros de atención sanitaria se instalan en *desiertos urbanos* con altos potenciales de accesibilidad (en vehículo privado por vías rápidas de comunicación), los cuales posteriormente funcionan como elemento de atracción hacia otros usos urbanos. Un ejemplo de ello se expone en la (Figura I-7), donde se ilustra la evolución de usos de suelo en un área de la periferia.

Figura I-7 Dinámica de usos de suelo en la periferia metropolitana de la C.M.



Fuente: MLU

Una bolsa de suelo vacante comienza un rápido proceso de urbanización al Oeste del municipio de Majadahonda, situada al Noroeste del municipio de Madrid en la órbita de las urbanizaciones vinculadas a la existencia de la autovía radial A-6 que conecta el centro del país con el Noroeste (A Coruña). El paso de una nueva infraestructura orbital,

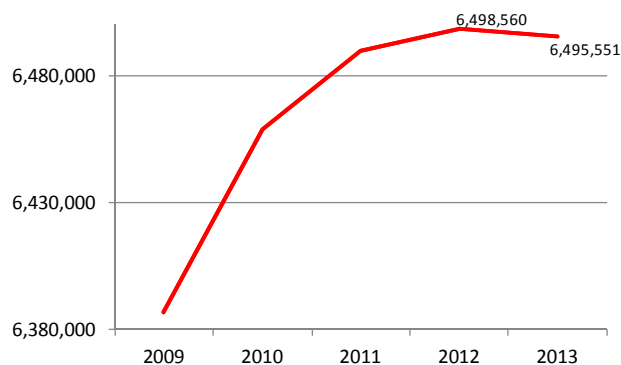
la vía rápida M-50, tal y como se aprecia en 2006 acelera los procesos de urbanización, entre los que se encuentra un gran centro de atención sanitaria (Hospital Puerta de Hierro). Este centro puede luego intensificar los procesos de *atracción* de otros usos de suelo, como el crecimiento de un parque residencial adyacente. La mejora y ampliación de una vía secundaria al Oeste con conexión a la M-50 también ha reestructurado otra gran bolsa de terreno que tal y como se observa en la imagen de 2009 (Figura I-7) ya cuenta con un proceso constructivo y un plan parcial en marcha.

I.5.6.- Un laboratorio para el análisis del crecimiento urbano en estado latente.

Los aspectos expuestos acerca de la dinámica general urbana de la C.M., sobre todo desde la óptica de los cambios de uso de suelo y la expansión del territorio metropolitano, la convierten en una región idónea para la investigación a cerca de los patrones que están funcionando para conformar este artefacto complejo. El gran dinamismo de la región metropolitana de Madrid, durante finales del siglo XX y comienzos del siglo XXI, la convierten en un verdadero *laboratorio* para el análisis de estructuras regionales europeas y más concretamente aquellas de carácter mediterráneo, desarrolladas y fuertemente influenciadas o vinculadas a la evolución y el desarrollo y transformación de un área metropolitana.

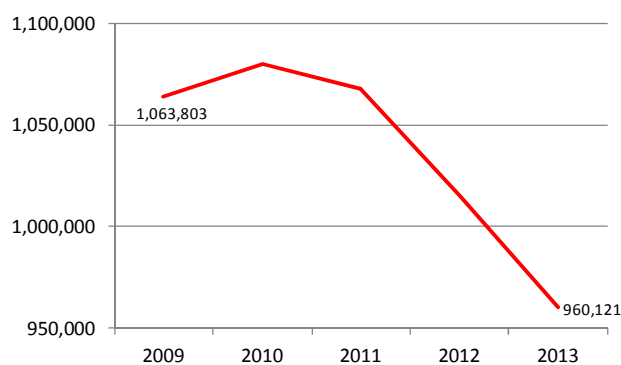
El dinamismo de la C.M. en cuanto a los valores de crecimiento urbano comienza a sufrir una ralentización continuada a partir de 2008 hasta nuestros hoy (2014), si bien los efectivos de población continúan incrementándose hasta el año 2012, donde se observa el primer punto de inflexión con un descenso de 3.000 habitantes (Figura I-8), lo cual puede significar, al menos el inicio de una etapa de estancamiento demográfico. En este sentido, es importante observar el descenso continuado de la población extranjera en la Comunidad de Madrid, qué entre 2009 y 2013 se ha reducido en algo más de 100.000 habitantes (Figura I-9).

Figura I-8 Evolución de la población en la Comunidad de Madrid, 2009-2013



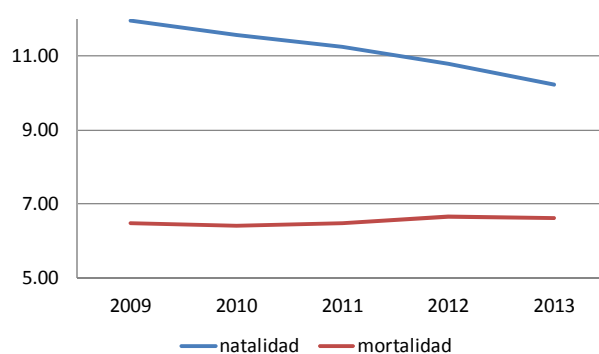
Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. Padrón continuo

Figura I-9 Evolución de la población extranjera en la Comunidad de Madrid, 2009-2013



Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. Padrón continuo

Figura I-10 Evolución de la natalidad y mortalidad en la Comunidad de Madrid, 2009-2013

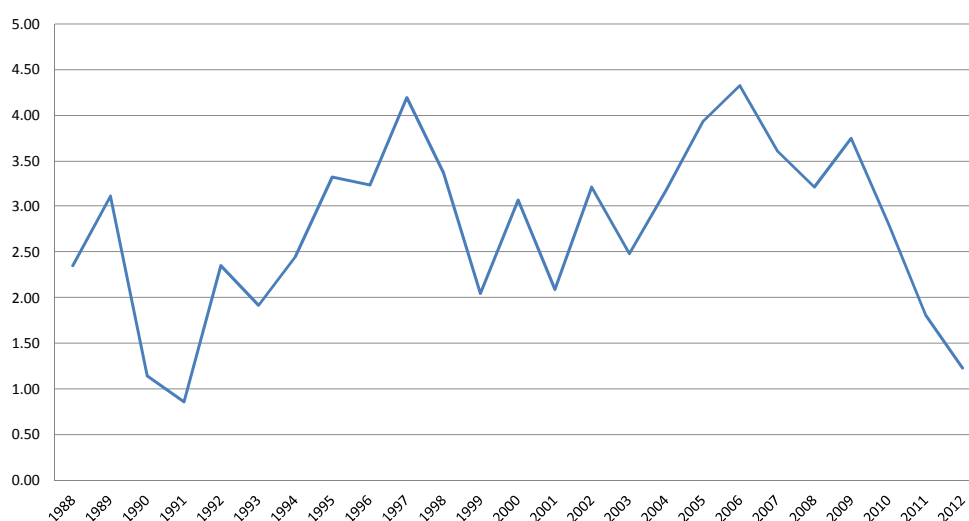


Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid. Padrón continuo

La tasa de natalidad también refleja a partir de 2009 un preocupante descenso, que unido al mantenimiento con ligero aumento de la tasa de mortalidad (Figura I-10), se suman a la propensión demográfica negativa, o cuando menos, hacia una fase de estancamiento para los comienzos de la segunda década del siglo XXI.

La clara ralentización urbanística, puede ser observada a través de estadísticas, como la evolución relativa del registro de unidades catastrales. Atendiendo a estos registros desde 1988, para el año 2012 se produce un descenso en el incremento porcentual de registros catastrales urbanos que se sitúa cerca de valores del 1%, como los observados durante la crisis económica de principios de los 90 (Figura I-11).

Figura I-11 Comunidad de Madrid. Evolución de unidades catastrales urbanas, 1988-2012 (%)

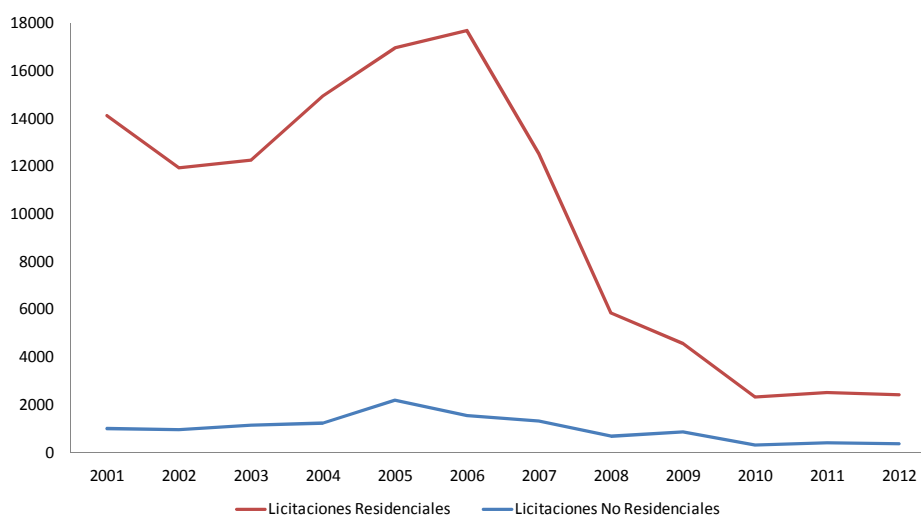


Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid

Otro indicador que hace vislumbrar una tendencia de paralización de los desarrollos urbanos en la Comunidad de Madrid, son las licitaciones de obra expedidas en la región. Tanto para obras residenciales, como para otro tipo de construcciones, se observa un claro declive a partir del año 2006, sobre todo en el sector residencial. En este año se licitaron 14.000 unidades de obra residencial, frente a las menos de 2.000 del año 2010. A partir de este mismo año, tanto las licitaciones residenciales como las dedicadas a otros usos, mantienen una clara línea de estancamiento, con unas 2.000 unidades

anuales para la obra residencial y en torno a las 400 unidades anuales para el resto de usos de las construcciones (Figura I-12).

Figura I-12 Número de licencias de obra en la Comunidad de Madrid, 2001-2012



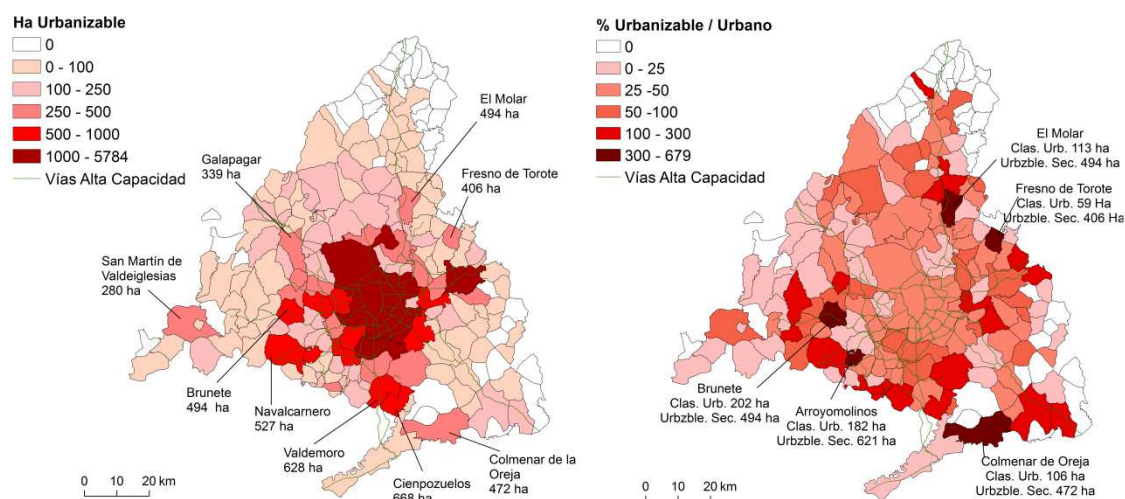
Fuente: Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid

A través de los planes de ordenación municipal vigentes en 2008 se puede observar como las grandes bolsas de suelo urbanizable sectorizado se encuentran en el municipio de Madrid y en las primeras coronas metropolitanas (Figura I-13, izquierda), si bien existen casos extraordinarios de municipios más periféricos como San Martín de Valdeiglesias, Navalcarnero, Ciempozuelos, Colmenar de la Oreja, El Molar o Fresno de Torote, que durante el '*tsunami urbanizador*' de la primera década del 2000, se sumaron a esta actividad frenética facilitando un importante número de hectáreas de suelo para su transformación urbana. La mayoría de estas clasificaciones continúan vigentes en los planeamientos municipales, y dado su carácter sectorizado, es suelo muy susceptible de convertirse en urbano en el caso de una nueva activación del sector inmobiliario y constructivo en la región

Observando la información del planeamiento municipal, un aspecto que muestra la carrera urbanizadora en la que estaba inmerso el territorio de la Comunidad de Madrid durante la primera década del 2000, son los crecimientos urbanos desproporcionados que las diferentes entidades municipales quisieron alcanzar y muchas lograron en esta

época. En este sentido, si se calcula la proporción de suelo urbanizable sectorizado, respecto al suelo clasificado urbano que los municipios de la región tenían previstos en su planeamiento de 2008, se encuentran entidades que han perseguido urbanizar más del 300% del suelo que ya tenían clasificado como urbano en ese mismo año (Figura I-13, derecha). Además, muchos de estos municipios se encuentran fuera de las primeras coronas metropolitanas, lo que indica que no pudiendo competir en accesibilidad en esta carrera urbanizadora con los municipios de las primeras coronas metropolitanas, podían hacerlo entonces a través de los precios del suelo más bajos.

Figura I-13 Comunidad de Madrid. Hectáreas de Suelo Urbanizable Sectorizado (SUC) y proporción de SUC por Suelo Clasificado Urbano, 2008.



Fuente: Elaboración propia. Datos del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid

En este trabajo, el periodo de cambio que más específicamente se ha analizado es el que abarca la primera década del año 2000 (2000-2009), coincidiendo con el comienzo de esta observada situación de latencia respecto a los ritmos de crecimiento urbano que se habían observado al inicio de esta década. Este aspecto es destacable de cara, tanto a la investigación como a trabajos prácticos de planificación, ya que da una oportunidad temporal para enfrentar análisis sobre lo ocurrido en el pasado, que ayuden a establecer juicios y valoraciones para apoyar desarrollos futuros más sostenibles de esta región. En este sentido, en el artículo de investigación incluido en esta tesis "Urban sprawl in the Mediterranean urban regions in Europe, and the crisis effect on the urban land development: Madrid as study case" (Díaz-Pacheco y García-Palomares, 2014) se trata

de reflejar lo ocurrido en este periodo respecto a la expansión del suelo urbano y el comienzo del impacto de la crisis financiera global a inicios del 2008. Además se da cuenta de que algunos discursos sobre el *sprawl* pueden contener bastantes matices dentro del ámbito Mediterráneo europeo, donde como en el caso de Madrid, el modelo urbano de dispersión, alta ocupación de suelo y bajas densidades residenciales, puede presentarse de manera más atenuada, o al menos con bastantes matices de diferenciación, respecto de los titánicos desarrollos difusos de otras grandes áreas metropolitanas globales.

I.6.- METODOLOGÍA Y FUENTES

I.6.1.- Metodología

El objetivo general que plantea la presente investigación es la evaluación de un MDUAC en varios de sus aspectos de aplicación, y en uno de sus elementos más característicos como es el efecto del cambio de la escala-resolución (ver objetivos I.2.). Para ello, se trazó un plan de trabajo sistemático que está formulado en un marco experimental explicativo de acuerdo a los objetivos mencionados. Sin embargo, durante el transcurso de la investigación, en el desarrollo de sus distintas fases, las líneas de trabajo adquirieron diferentes connotaciones desde el punto de vista metodológico y el alcance de los resultados.

En algunos momentos la investigación ha tenido un carácter exploratorio, sobre todo en las cuestiones teóricas que envuelven el desarrollo de aplicaciones dinámicas basadas en sistemas complejos, como son los autómatas celulares. Al fin y al cabo, la ciencia de la complejidad y la aplicación de modelos basados en sistemas complejos a problemas geográficos, si bien alcanza cierto grado de desarrollo, aún requiere seguir indagando en sus fronteras y aplicación práctica.

En otras etapas de este trabajo, los aspectos metodológicos tomaron un cariz empírico, derivado de la actividad de búsqueda y ensayo con los datos geográficos e información estadística. Del mismo modo, las acciones de calibración y validación de las aplicaciones dinámicas de cambio de usos de suelo tienen una gran carga de

positivismo, dado que muchos de estos procesos se basan en tareas que engloban continuos y extensos análisis de prueba/error.

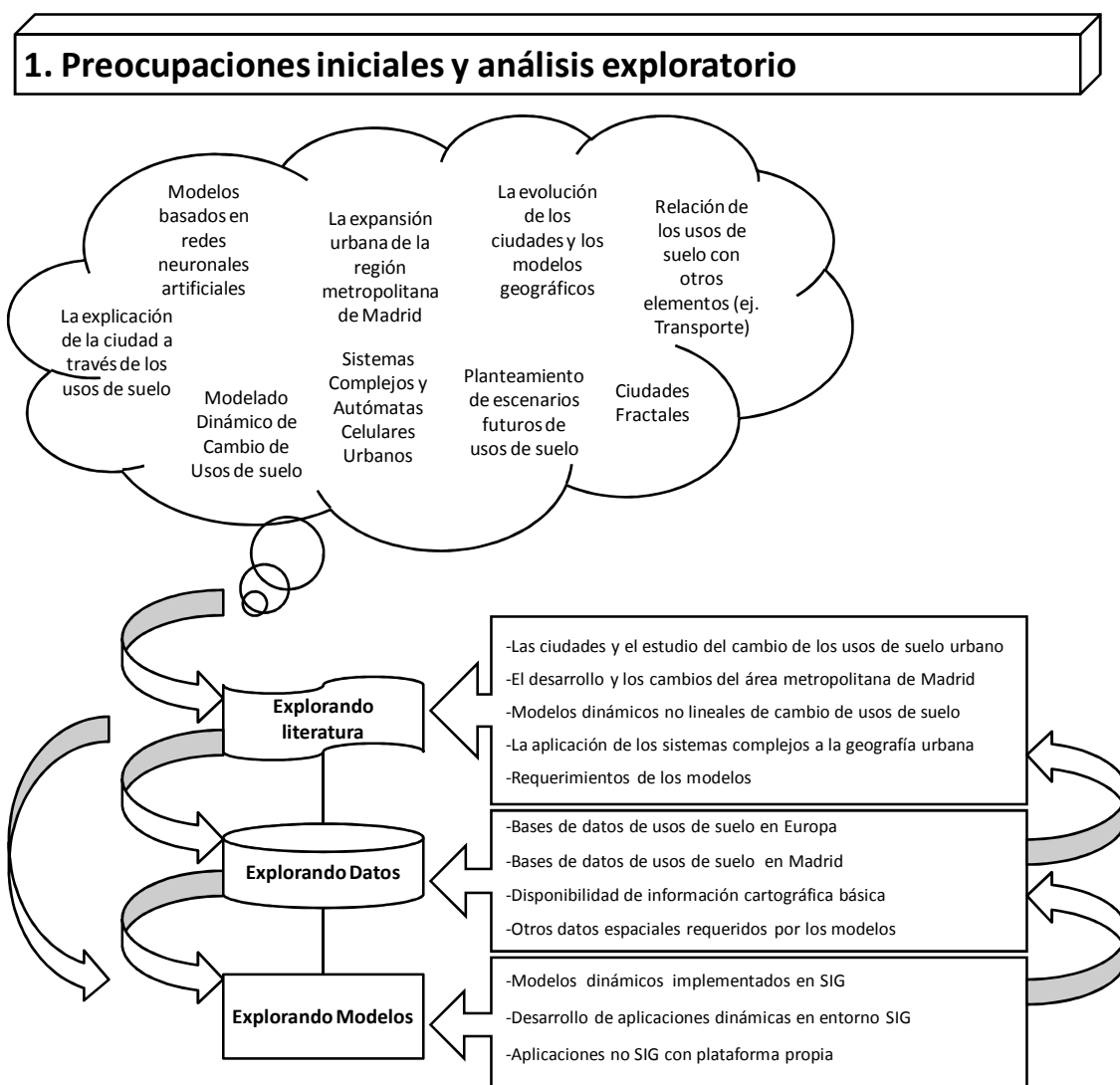
La metodología de esta investigación se ha desarrollado de manera paralela al progreso del investigador, en este caso, para la consecución del objetivo principal planteado. De este modo, en este trabajo, como ya se ha mencionado, pueden distinguirse 5 grandes etapas de desarrollo metodológico, las cuales se han organizado de manera general en 4 fases diferenciadas: 1ª) Preocupaciones iniciales y análisis exploratorio; 2ª) Planteamiento de objetivos y preguntas de investigación; 3ª) Desarrollo de los trabajos, teóricos y empíricos (teoría, información, datos y modelos); 4ª) Presentación de discusión y resultados sobre las preguntas planteadas.; 5ª) Conclusiones generales sobre el objetivo general de la investigación.

Las fases 3ª y 4ª, de alguna manera sufren reiteraciones, en el sentido de que a lo largo de la investigación se llevan a cabo distintos trabajos prácticos (fase 3ª) y se presentan discusiones, trabajos y resultados sobre los mismos (fase 4ª), que giran en torno a cada una de las preguntas y objetivos específicos, los cuales permiten finalmente establecer las conclusiones abordadas en la fase 5ª.

1.6.1.1.- Preocupaciones iniciales y análisis exploratorio.

En esta primera etapa de la investigación van a surgir una serie de análisis de carácter exploratorio, a partir de una nube en la que se cruzaban distintas inquietudes a cerca de la ciudad (La ciudad y los usos de suelo urbano; los modelos dinámicos de cambio de usos de suelo; las relaciones de los usos de suelo y el transporte urbano; los modelos basados en autómatas celulares; el crecimiento urbano de Madrid...). Se trabajó tanto en la teoría que envolvía estas cuestiones, como en el requerimiento de datos y los primeros desarrollos de aplicaciones basadas en modelos dinámicos de cambio de usos de suelo (ver Figura I-14).

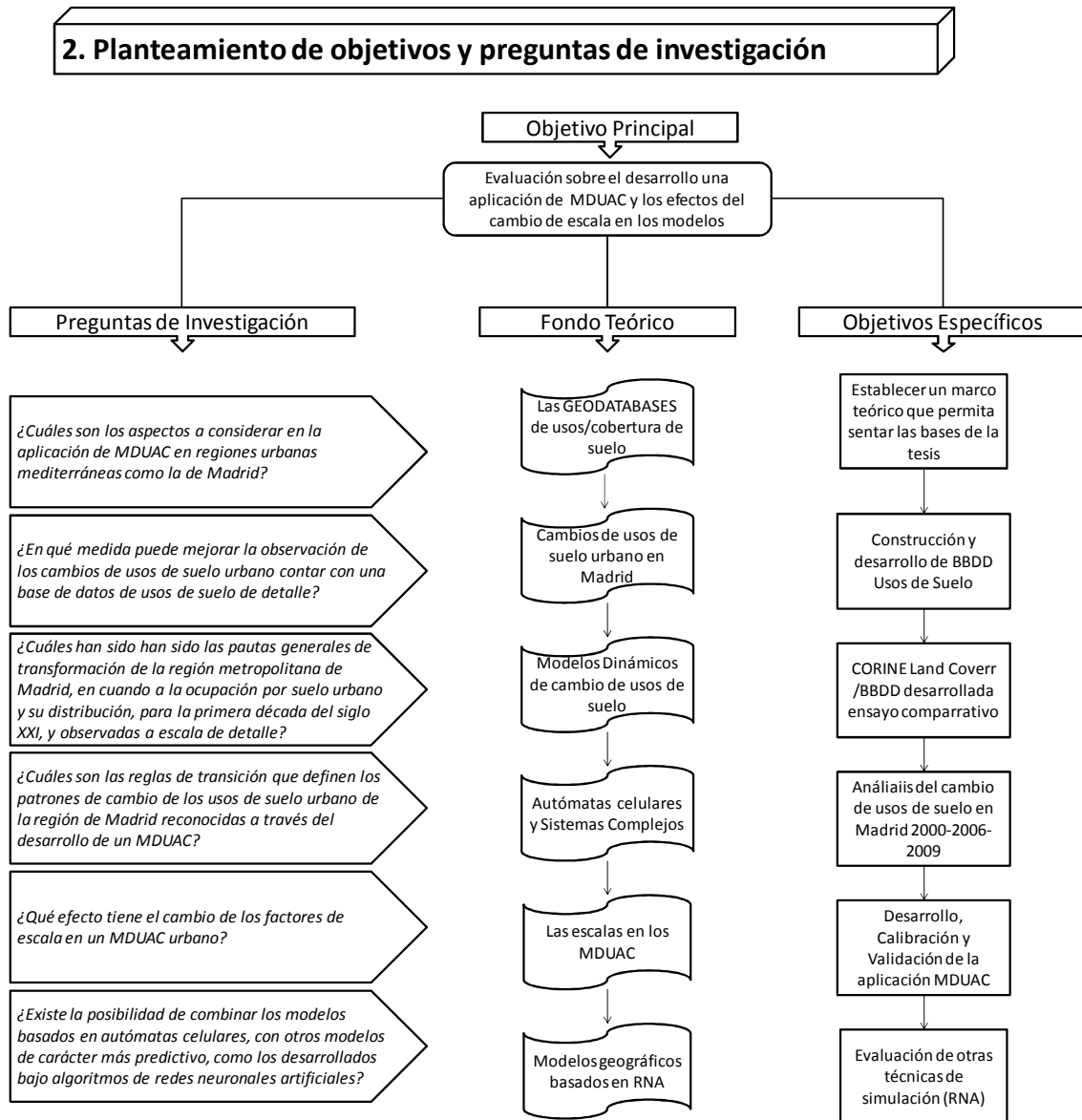
Figura I-14. Primera fase de la investigación



I.6.1.2.- Planteamiento de objetivos y preguntas de investigación.

A partir del amplio análisis exploratorio realizado en la primera fase de la investigación se plantearon una serie de preguntas de investigación y unos objetivos general y específicos, en referencia a estas cuestiones planteadas (Figura I-15). En este sentido es importante señalar en este trabajo, que el objetivo general de esta investigación se encuentra a cierta distancia de algunos objetivos que fueron esbozados antes del análisis exploratorio inicial. Es decir, algunas de las preocupaciones iniciales de la investigación redujeron su grado de atención en pro de la concentración hacia otras.

Figura I-15.- Segunda fase de la investigación



Para aclarar este último punto con un ejemplo, al principio, uno de los objetivos que esbozaba esta investigación era el de explicar el crecimiento del área metropolitana de Madrid y presentar escenarios futuros de cambio de usos de suelo para el apoyo de decisiones de planificación, utilizando para ello modelos basados en autómatas celulares. Trabajos de este tipo habían sido llevados a cabo en Madrid por investigadores, utilizando métodos similares (véase Barredo y Gómez, 2008; Hernández-Jiménez et al., , 2009; Gallardo Beltrán, 2014). Durante el desarrollo del mismo, surgen varias preguntas y al mismo tiempo nuevos objetivos de investigación.

Surgen preguntas acerca de la importancia de los datos en el modelo empleado, surgen dudas sobre el efecto del cambio de elementos, como la escala; en el mismo modelo, aparecen cuestiones sobre mejoras del cálculo de factores de un factor de aptitud urbana empleado en la aplicación dinámica, y también, por ejemplo, aparecen nuevas técnicas de modelado, que se observa, merecen su atención en este campo para su posible integración con el modelo explorado. Además, se crean nuevas inquietudes sobre el fondo teórico acerca del uso de estos modelos en la resolución de problemas geográficos y específicamente en entornos urbanos. En definitiva, toda una serie de aspectos que en cierto modo cambian el objetivo principal (esbozado en la fase inicial), orientado a resolver problemas de planificación urbana con el apoyo de un modelo, por otro. Este último más dirigido a mejorar la comprensión y el uso de modelos dinámicos de cambio de usos de suelo basados en autómatas celulares. Ambos objetivos tienen aspectos en común y además servirán para realizar contribuciones en el mismo campo, sin embargo, es cierto que "la planificación urbana" y el fenómeno "ciudad", quedan en otro plano para trasladar el enfoque al estudio de la herramienta y su desarrollo, en este caso los MDUAC.

1.6.1.3.- Desarrollo de los trabajos teóricos y empíricos (teoría, información, datos y modelos)

El objetivo principal y objetivos específicos de este trabajo marcan el curso de una investigación de alto contenido práctico. El trabajo con bases de datos computacionales para generar una información precisa y de detalle ha ocupado buena parte del tiempo del desarrollo de la investigación, así como el desarrollo, calibración y validación de las aplicaciones MDUAC que luego son evaluadas. También la valoración de un modelo basado en redes neuronales artificiales (RNAs) para su posible integración con el MDUAC, integra una carga de trabajo empírico sustancial. Además, todas estas aproximaciones conllevan también una revisión de trabajos anteriores en torno a las teorías de sistemas complejos aplicadas al crecimiento urbano; la expansión urbana de área metropolitana de Madrid; el estudio de los usos/cobertura de suelo y la construcción de bases de datos; y el desarrollo de los modelos dinámicos de cambio de usos de suelo y de manera más específica e intensa de aquellos basados en autómatas celulares. Sobre este último se dirige fundamentalmente el objetivo principal de la

investigación, y en concreto hacia la cuestión del efecto del cambio de la escala/resolución en estos modelos.

Los métodos empleados para afrontar todos estas tareas se encuentran reflejados en cada uno de los artículos científicos presentados en este trabajo, no obstante, dado que conforma el eje de esta investigación, cabe realizar en este apartado, un resumen sobre la metodología empleada para el desarrollo, calibración y validación de la aplicación de MDUAC, si bien ésta se encuentra más ampliamente explicada en el artículo 'The influence of spatial scale in applying CA models for urban land use change' (Bloque 2)⁵.

El MDUAC sobre el que se han desarrollado las aplicaciones tiene un amplio desarrollo. Planteado inicialmente por White y Engelen (1993), manteniendo su estructura básica original ha sufrido algunas modificaciones sobre su base original, en función de su aplicación (Engelen et al., , 1996; White y Engelen, 1997; White et al., 1997; White y Engelen, 2000). El modelo alcanza una importante difusión a través del proyecto europeo MOLAND, empleado por el Centro de Investigación Conjunta (JRC) para desarrollar un marco de actuación sobre las dinámicas urbanas y regionales de los usos de suelo en la Unión Europea (Engelen et al., . 2007).

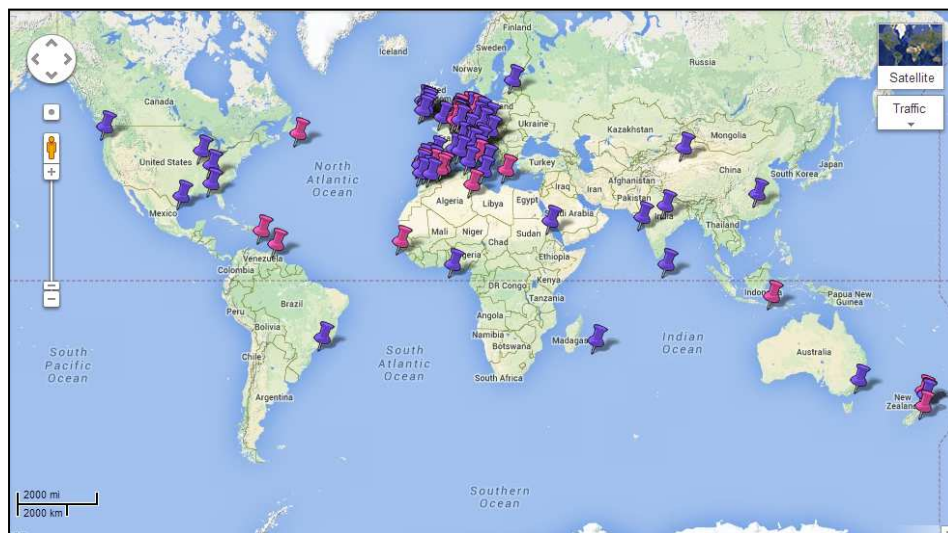
La aplicación desarrollada en este trabajo se ha realizado mediante el software comercial de denominado METRONAMICA. Este software se presenta como una herramienta para la planificación para simular y evaluar de manera integrada sus efectos en el desarrollo urbano y regional de un territorio. Esta herramienta se desarrolla en el Instituto de Investigación para el Conocimiento de Sistemas (RIKS, Research Institute for Knowledge Systems) y ha sido aplicada con diferentes objetivos en diferentes regiones del mundo, predominando las aplicaciones realizadas en Europa (ver Figura I-16).

METRONANICA tiene la capacidad de realizar modelizaciones basadas en un entorno que funciona a una escala regional (o macro-escala) y una escala local (micro-escala),

⁵ En este artículo incluido en este trabajo, la aplicación específica de este trabajo se explica en profundidad, así como los métodos de calibración y validación empleados.

donde los estados de usos de suelo están representados en un espacio geográfico celular (plataforma raster). En la escala regional se integra un modelo económico que simula los cambios demográficos y económicos que generan la demanda de usos de suelo, integrando además la propia simulación del cambio de usos de suelo a partir del modelo 'local' (escala celular). Ambas escalas están integradas, interactuando entre sí. El modelo 'local' es capaz de ejecutarse de manera independiente, de modo que el cálculo de la demanda de usos de suelo se realiza de manera externa. Este tipo de aplicación se denomina 'single' en la versión del software destinada a tal efecto.

Figura I-16.METRONAMICA. Mapa de localización de experiencias de aplicación



Fuente: RIKS en <http://www.metronamica.nl/> (27/10/2014)

En este trabajo se ha empleado la versión 'single' de METRONAMICA, ya que el enfoque de investigación está centrado en el modelo de simulación del cambio de usos de suelo y las variables espaciales que lo conforman. De este modo, la demanda de usos de suelo (hectáreas que cada uso de suelo varía anualmente) se calcula para un escenario en el que se aplica un incremento anual de demanda de usos de suelo equivalente a la que existió durante los periodos temporales analizados previamente (en este caso 2000 - 2009). Esto quiere decir que sin entre 2000 y 2009 la demanda anual del uso de suelo industrial fue del 1%, el incremento de la demanda simulada de suelo industrial para el periodo 2009-2010 será aplicada también al 1%.

La calibración del modelo se puede dar por concluida cuando una serie de parámetros estadísticos basados en métricas espaciales, además de un análisis visual tienen un alto grado de coincidencia entre los datos de usos de suelo simulados (2006') y los datos de suelo de entrada (2006). El proceso de calibrado se realiza de modo empírico y el proceso puede alargarse en el tiempo, de hecho la aplicación de Madrid requirió la inversión de más de 250 horas. Esto que puede considerarse como algo negativo, no lo es tanto, en cuanto a que la curva temporal de aprendizaje del investigador, tanto sobre el modelo como sobre el funcionamiento de los usos de suelo, tiene una forma exponencial. Además los datos de calibración quedan almacenados y pueden funcionar perfectamente como punto de partida para modelos similares relacionados en entornos metropolitanos.

El proceso de validación consiste luego en aplicar los factores de transición obtenidos durante el proceso de calibración, en un ejercicio de simulación desde el momento temporal 2006 (datos de entrada) hasta el momento 2009. De este modo se puede luego realizar la correspondiente comparación de datos (mapas de usos de suelo) entre 2009' (simulado) y 2009 (datos de entrada).

Las reglas o el potencial de transición son el núcleo de la aplicación, y es donde está implementada la ecuación simple, cuyos términos definen el comportamiento espacial de los usos de suelo en la simulación (Figura I-18). La función tendría la siguiente forma:

$$P_j = N_j A_j S_j \propto_z Z_j$$

Ecuación I-2. Normas de transición. MDUAC

Donde:

P_j : Es la transición potencial de la celda j para mutar a un determinado uso de suelo.

A_j : Es la distancia desde la celda j hacia cualquier elemento vinculado al desarrollo, en este caso, de alguna clase de suelo de urbano (red de transporte, estaciones de metro, estación de ferrocarril, centros comerciales...).

N_j : Es una función de suma de pesos para expresar la influencia del estado de una celda j sobre un grupo de celdas específico dentro de un radio de distancia.

S_j : Es la aptitud de la celda j para mutar a un estado específico.

α_z : Es un parámetro estocástico que introduce perturbaciones aleatorias en la celda j

Z_j : El estado de planeamiento (políticas, planificación, restricciones...) para la celda j

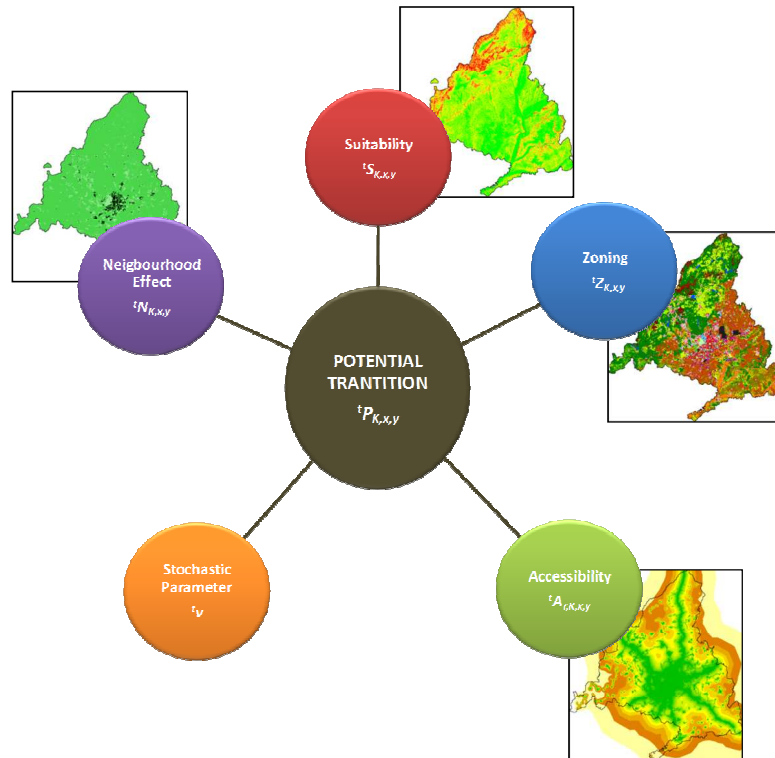
La vecindad se expresa como la influencia del estado de una celda j sobre un grupo específico de celdas dentro de un rango específico de distancia. Esta función es la que define en esencia al autómata celular, ya que define los estados de usos de suelo futuros de una celda en base a al estado de usos de suelo de sus celdas vecinas. La expresión viene dada por:

$$N_j = \sum_x \sum_k N_{kxd} I_{kxd}$$

Ecuación I-3. Cálculo de vecindad. MDUAC

Donde N_{kxd} es el parámetro de peso ejercido sobre las células de estado k , a través de la fuerza de interacción x , de todas las células dentro de una distancia d ; y I_{kxd} es el denominado factor de inercia, que funciona en los mismos términos, pero cuyo peso se utiliza para representar la 'fuerza' ejercida por una celda para permanecer inmutable.

Figura I-18. Las normas de transición potencial



El parámetro estocástico α_j , tiene una papel también muy importante en el modelo, ya que introduce en el sistema un factor de perturbación, que se considera propio de la evolución de los cambios de suelo expresado como un sistema complejo de interacciones humanas donde existen patrones pero también se encuentran de manera común los procesos azarosos. La función responde a: $-\ln(1 - R)^\alpha$. Donde R representa una malla de celdas de valores aleatorios y α es un coeficiente que toma valores entre 0 y 1, para cambiar la dispersión de los valores. Es decir, cambia el tipo de perturbación. Si el coeficiente es más alto, la dispersión de la distribución de los valores aleatorios es mayor. Esto se puede traducir luego en el MDUAC en el surgimiento de algún tipo de suelo en un área concreta, ej. suelo urbano, en un área en la que sin existir fuerzas de interacción con otras clases de suelo, surge de manera aleatoria una porción de suelo urbano alejada del resto. Este tipo de eventos ocurre en la realidad y muy pocos modelos son capaces de simularlo como lo hacen aquellos basados en autómatas celulares.

La accesibilidad A_j , es un factor que juega un papel importante, sobre todo en ambientes urbanos, donde la expansión del suelo se encuentra muy vinculada a elementos como la red de transporte. Un área más cerca de una infraestructura de transporte puede ser más susceptible de ser ocupada por suelos urbanos. En este sentido, los distintos elementos y las distancias a los mismos, también se calibran con una función de pesos entre la distancia y la importancia del elemento. De este modo en el modelo se puede considerar que estar situado cerca de una autopista puede tener más peso para el suelo urbano que estar cerca de una carretera comarcal. Los pesos de distancia hacia las mismas, también son modificables.

La aptitud S_j , es un factor que puede estar representando cualquier variable social, económica, ambiental o la combinación de algunas de ellas. De acuerdo al fundamento de este modelo, aquellas variables inherentes a los usos de suelo deben quedar fuera de este factor, ya que esas interacciones están reflejadas ya en la vecindad. Del mismo modo las cuestiones relacionadas con la accesibilidad, tampoco deben incluirse aquí, ya que del mismo modo resultarían redundantes en el modelo. En la aplicación

desarrollada en este trabajo, sólo se ha considerado la pendiente física del terreno como factor de aptitud para el desarrollo de las distintas clases de suelo urbano.

La zonificación (*zoning*) Z_j , es un término muy útil cuando se quieren crear factores limitantes o incentivos en el modelo. En modelos urbanos, pueden aplicarse valores próximos a cero en áreas protegidas, para que la simulación de suelo urbano en esas áreas sea extremadamente baja, o cero para anular por completo esta posibilidad. La zonificación puede condicionar bastante la localización de los cambios de usos de suelo en las simulaciones y también anular el efecto de cualquier otro factor. Por este motivo, en la aplicación que desarrolla esta investigación este factor no se ha incluido con la intención de condicionar lo menos posible las fuerzas de interacción entre los usos de suelo, representadas mayormente en el factor de vecindad.

1.6.1.4.- Presentación de discusión y resultados sobre las preguntas planteadas.

Esta fase de la investigación, al igual que la anterior, no expresa un orden cronológico en su numeración, ya que durante la investigación la presentación de discusiones y resultados han sido recurrentes durante todo el proceso. Este hecho queda reflejado en la preparación de artículos para su publicación, incluidos en este trabajo, donde de manera modular se han tratado de ir satisfaciendo las preguntas de investigación planteadas en este trabajo.

1.6.1.5.- Conclusiones generales sobre el objetivo general de la investigación.

Responde a la última etapa de este trabajo y es donde de manera concreta se tratan de combinar las conjeturas fruto de los resultados obtenidos a lo largo de esta investigación. Las conclusiones tratan de aunar las explicaciones derivadas de cada una de las fases del trabajo donde a través de una serie de preguntas y objetivos específicos se perseguía un objetivo general.

1.6.2.- Fuentes

Entre las fuentes empleadas para la consecución de los objetivos trazados en esta investigación, se encuentran las fuentes bibliográficas; las fuentes de datos estadísticos,

sobre todo de carácter demográfico; y fuentes cartográficas, sobre todo relativas a los usos y cobertura de suelo. Todas estas fuentes se encuentran especificadas en los apartados destinados a tal efecto de cada uno de los artículos de investigación incluidos en este trabajo; además, las fuentes bibliográficas externas a los mencionados artículos, se encuentran también recogidas en el correspondiente capítulo de este documento. No obstante, en este apartado se detallan algunas de las fuentes de información que han resultado indispensables para la elaboración de esta investigación.

Las fuentes de datos estadísticos, sobre todo aquellos relativos al análisis del crecimiento y la distribución de la población en la Comunidad Autónoma de Madrid (CAM), han sido tratados espacialmente a partir de la información producida por el Instituto Nacional de Estadística, específicamente de datos provenientes de la explotación del Padrón Municipal de Habitantes.

En el caso de datos cartográficos auxiliares, como redes de transporte, límites administrativos y cartografía urbana de detalle, etc. se ha combinado el uso de información cedida por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) y los correspondientes departamentos de la C.M. De la información obtenida del IGN, debe destacarse la información contenida en bases de datos geográficas como Cartociudad, además de el Mapa Topográfico Nacional 1:25.000. En el caso de la información suministrada por la CAM, deben destacarse las imágenes correspondientes a las capturas aéreas ortofotogramétricas para el año 2000, 2006 y 2009; los datos de cartografía urbana de detalle (1:5000, 1:1000) proporcionados por la Dirección General de Urbanismo y Estrategia territorial de la Comunidad de Madrid.

Por último, cabe citar en este apartado la base de datos geográfica de cambios de usos de suelo con información para los años 2000, 2006 y 2009, de escala 1:10.000, denominada Madrid Land Use (MLU)⁶, desarrollada por el Departamento de Geografía

⁶ La información sobre el desarrollo de esta base de datos geográfica de cambio de usos de suelo, se encuentra explicada de manera extendida en artículo incluido en este trabajo: Díaz-Pacheco, J., y García-Palomares, J. C. (2014).

de la Universidad Complutense de Madrid, y cuya elaboración se integra en gran parte en el avance de la presente investigación.

MLU, es una fuente de información elaborada, inicialmente trazada con enfoque sobre los usos de suelo urbano, con una unidad mínima cartografiada de 100 m. Este hecho se deriva de la necesidad de contar con una información detallada y temporal de cierta precisión y detalle, elaborada para todos sus momentos con el mismo criterio. Información disponible de este tipo, como CORINE Land Cover, cumplían este último requisito, sin embargo su precisión no permitía cumplir el objetivo principal de la investigación.

La información sobre usos de suelo que suministraba MLU, se enriqueció posteriormente con el añadido de una serie de usos de suelo de carácter no artificial proveniente del Centro de Investigaciones Ambientales de la Comunidad de Madrid (CIAM).

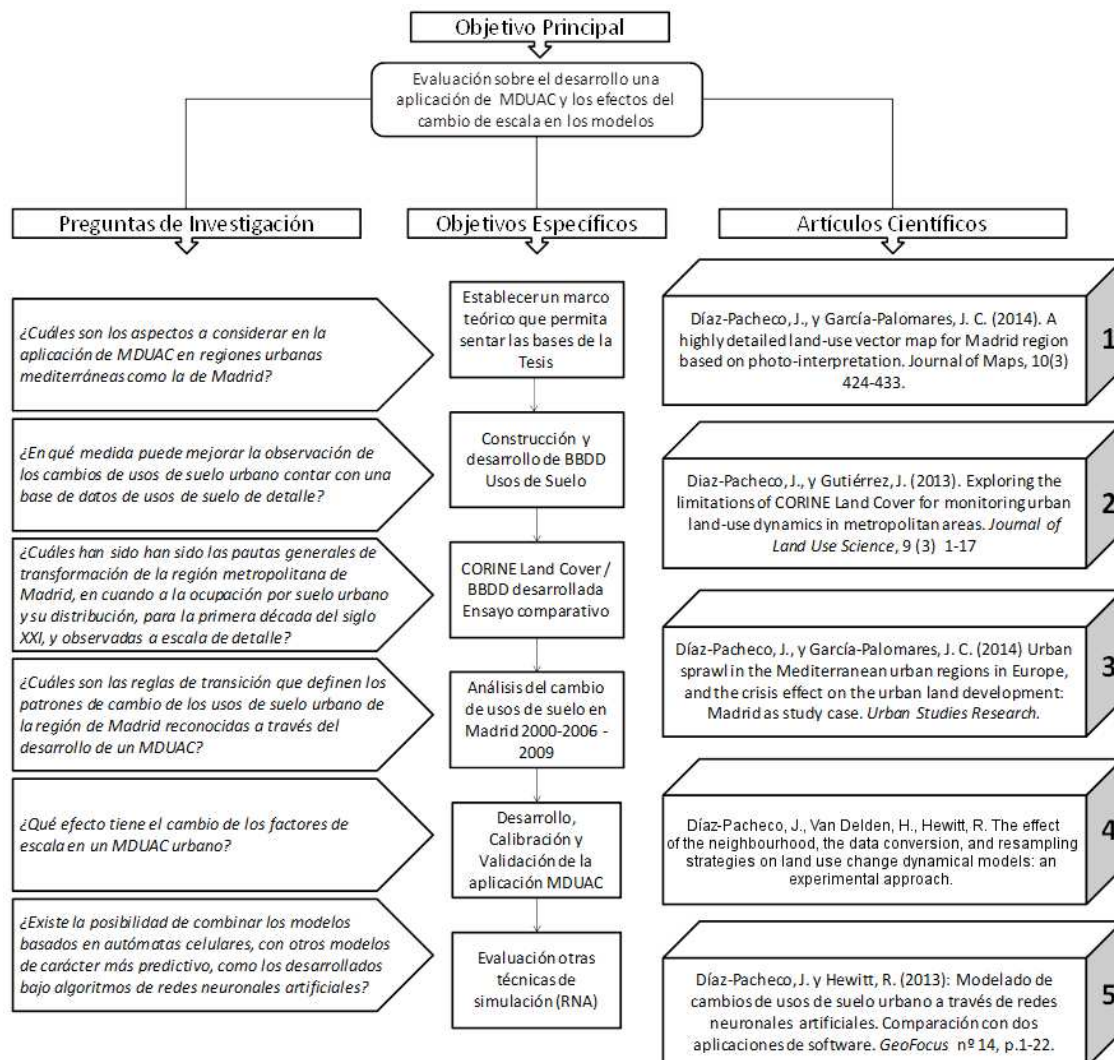
La información de usos de suelo urbano fue capturada a través de la detección visual de formas urbanas proporcionadas por los mencionados vuelos ortofotogramétricos de la C.M. A través de la división del espacio de manera sistemática en 1.436 unidades (cada una ocupando 6.25 km²) en una rejilla que cubre todo el área de estudio. Además, las unidades extraídas de usos de suelo urbano de MLU están espacialmente conectadas con las unidades censales del Instituto Nacional de Estadística, lo cual incrementa notablemente su grado de utilidad.

BLOQUE II.- ARTÍCULOS CIENTÍFICOS

II.1.- ORGANIZACIÓN DE LOS ARTÍCULOS.

En este bloque del trabajo, se presentan una serie de cinco documentos en formato de artículo de investigación que conforman el núcleo de la investigación. Cuatro de estos artículos han sido ya aceptados para su publicación en revistas científicas de impacto, uno se encuentra en proceso de envío y revisión a una revista científica internacional. Cada uno de los artículos está orientado a la discusión de los resultados vinculados a las preguntas y los objetivos específicos de esta tesis, y en conjunto se dirigen a la consecución del objetivo general planteado (Figura II-1).

Figura II-1 Vinculación de los artículos científicos con la investigación



Los artículos siguen un orden que responde a la metodología de trabajo desarrollada y se encuentran vinculados entre sí, de manera que reflejan el avance de la investigación. A continuación se detalla brevemente el contenido de cada uno:

1º) *A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation.*

El primer artículo publicado en 2014 por la revista *Journal of Maps*, "A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation" describe y analiza la construcción de la base de datos geográfica de usos de suelo, MLU, desarrollada en gran parte durante esta investigación y que luego garantiza los trabajos de análisis de cambio de usos de suelo en la Comunidad Autónoma de Madrid, además de servir de base íntegra para el trabajo con el MDUAC y la evaluación de los efectos de cambio de escala en el mismo.

2º) *Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas.*

El segundo artículo, publicado en 2013 por la revista *Journal of Land Use Science*, "Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas", valora el grado de precisión de CORINE Land Cover como base de datos de usos de suelo de uso generalizado en la Unión Europea, en cuanto a su capacidad para medir los cambios de usos de suelo en entornos urbanos. Para ello se utilizó como referencia MLU, para al mismo tiempo corroborar su validez como fuente principal de información de usos de suelo en el desarrollo de esta investigación.

3º) *Urban sprawl in the Mediterranean urban regions in Europe, and the crisis effect on the urban land development: Madrid as study case.*

El tercer artículo, actualmente aceptado por la revista *Urban Studies Research*, "Urban sprawl in the Mediterranean urban regions in Europe, and the crisis effect on the urban land development: Madrid as study case", con la excusa de este enunciado realiza el análisis de los cambios de usos de suelo en la región de Madrid durante el periodo de

estudio 2000-2006-2009. Este análisis resulta, de acuerdo a la metodología planteada, necesario para el posterior desarrollo de modelos de simulación, pero además aporta resultados sobre las pautas de transformación urbana de esta región en la primera década del siglo XXI.

4º) The effect of the neighbourhood, the data conversion, and resampling strategies on land use change dynamical models: an experimental approach.

El cuarto artículo, en proceso de envío para su revisión, " The effect of the neighbourhood, the data conversion, and resampling strategies on land use change dynamical models: an experimental approach", conforma la clave de este trabajo, ya que está vinculado estrechamente a la consecución del objetivo principal de esta investigación. Su desarrollo incluye la elaboración del MDUAC para la región de Madrid, con los resultados de todo el proceso de calibración y validación del modelo. Además, en este trabajo se evalúan los efectos de la escala en el modelo, incluyendo un análisis de los factores de conversión de escala/resolución en los inputs de la aplicación (datos de usos de suelo).

5º) Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software.

El quinto artículo, publicado por la revista *GEOFOCUS* en 2014, "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", responde a dos líneas inherentes a esta investigación y a la metodología de trabajo establecida. Por un lado, este trabajo continua profundizando en la búsqueda de pautas y patrones de transformación de la región de estudio, y por otro, experimenta con otro tipo de modelos dinámicos no lineales de cambio de usos de suelo, en este caso basado en el cálculo de las reglas de transición por medio de las denominadas redes neuronales artificiales. En el artículo además, se discute sobre las posibilidades de estos modelos para servir como apoyo en el cálculo del factor de aptitud en los MDUAC, y se comparan dos aplicaciones de software que incluyen este tipo de algoritmos.

A continuación, se presentan los mencionados artículos descritos:

II.1.1.- A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation.



Journal of Maps

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tjom20>

A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation

Jaime Díaz-Pacheco^a & Juan Carlos García-Palomares^a

^a Human Geography, Complutense University, Madrid, Spain

Published online: 28 Jan 2014.

To cite this article: Jaime Díaz-Pacheco & Juan Carlos García-Palomares (2014) A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation, *Journal of Maps*, 10:3, 424-433, DOI: [10.1080/17445647.2014.882798](https://doi.org/10.1080/17445647.2014.882798)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2014.882798>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

This article was downloaded by: [89.140.196.249]

On: 04 September 2014, At: 10:46

Publisher: Taylor & Francis

Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Journal of Maps

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tjom20>

A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation

Jaime Díaz-Pacheco^a & Juan Carlos García-Palomares^a

^a Human Geography, Complutense University, Madrid, Spain

Published online: 28 Jan 2014.

To cite this article: Jaime Díaz-Pacheco & Juan Carlos García-Palomares (2014) A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation, *Journal of Maps*, 10:3, 424-433, DOI: [10.1080/17445647.2014.882798](https://doi.org/10.1080/17445647.2014.882798)

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/17445647.2014.882798>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Taylor & Francis makes every effort to ensure the accuracy of all the information (the "Content") contained in the publications on our platform. However, Taylor & Francis, our agents, and our licensors make no representations or warranties whatsoever as to the accuracy, completeness, or suitability for any purpose of the Content. Any opinions and views expressed in this publication are the opinions and views of the authors, and are not the views of or endorsed by Taylor & Francis. The accuracy of the Content should not be relied upon and should be independently verified with primary sources of information. Taylor and Francis shall not be liable for any losses, actions, claims, proceedings, demands, costs, expenses, damages, and other liabilities whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with, in relation to or arising out of the use of the Content.

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden. Terms & Conditions of access and use can be found at <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

SCIENCE

A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation

Jaime Díaz-Pacheco* and Juan Carlos García-Palomares

Human Geography, Complutense University, Madrid, Spain

(Received 16 May 2013; resubmitted 8 January 2014; accepted 9 January 2014)

Land Use – Land Cover (LULC) maps have developed remarkably since the global community became aware of the importance of knowing where LULC change is taking place on the Earth's surface. The rapid evolution of geographic information data handling and the automation of satellite image interpretation through remote sensing techniques and algorithms is providing increasingly abundant and up-to-date information on LULC. In addition, at large detail scales, it is important to link LULC maps to available statistical information, such as census information and business activities, which allow land parcels to be more accurately classified. Though automated classification methods can produce useful maps at smaller detail scales, it is not usually possible to accurately map urban areas at large scales without considerable investment of human resources. The development of large-scale information for urban areas is very important, especially in urban areas with accelerated rates of urban change which may jeopardize natural resources and citizens' quality of life. In this paper, the creation of a set of large detail scale LULC maps and accompanying geodatabase for one such dynamic urban change region, the Madrid Autonomous Community (AC), Spain, is discussed.

Keywords: land use map; highly detailed scale; photointerpretation; land use models; Madrid

1. Introduction

Land Use – Land Cover (LULC) maps and geodatabases have developed remarkably owing to the fact that they have become one of the principal tools for monitoring environmental change. For the global change community, it is not sufficient to know that the human-environment will expand, shrink, or intensify a particular land use; they also need to know *where* these changes will take place (Turner, 2001). From this starting point, a great number of LULC maps and geodatabases have been developed for different spatial contexts (global, regional, local). These databases have been developed from similar perspectives but in different ways with most of them based on recent periods (Skokanová et al., 2012). Within the context of this paper land use refers to the human utilization of the land such as settlements, crops, pasture, recreation, and so on, while land cover denotes the physical state of the land, for example the quantity and type of surface vegetation, water, and Earth materials (Turner & Meyer, 1994).

*Corresponding author. jdiazpac@ucm.es



Global examples of projects which involve LULC maps and geodatabases are the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP); the international Human Dimensions Programme on Global Environmental Change (IHDP); and the History Database of the Global Environment (HYDE). The last of these intends to obtain patterns of land use for the last 300 years (Goldewijk, 2001). The IGBP-IHDP project, aims, among other things, to explore LULC changes on the Earth's surface (e.g., desertification, biodiversity loss, soil loss) Turner et al. (1990) cited in Goldewijk (2001). In Europe, one remarkable initiative to gather LULC information has been CORINE Land Cover (CLC). CLC aims to coordinate and homogenize compatible data and environment information among European Member States and also with other International datasets.

Exploring a set of LULC maps and geodatabases (the previously mentioned IGBP-IHDP, HYDE, CLC; Deng, Huang, Rozelle, & Uchida, 2010; Diaz-Pacheco, 2013; Hansen, DeFries, Townshend, & Sohlberg, 2000; Ménard & Marceau, 2012; Romano & Zullo, 2012; Samat, 2006) we found that they could be classified by (1) the procedure employed to extract the LULC information (classification process); (2) the extent and mapping scale; and (3) the temporality (periodicity and number of available time periods). In more detail:

- (1) LULC Procedure: generally LULC maps and geodatabases are created through processes of classification of aerial or satellite imagery. This process could be automatic, computer-assisted, or based on photo-interpretation. The first usually corresponds to the methods employed in remote sensing processes for information acquisition; the second refers to classification methods where the information produced by the automatic procedure is checked later by expert technicians; and the last would principally employ human criteria to classify and interpret the images and LULC classes. Both, the global initiatives and the regional approaches to create LULC information usually employ automatic or computer-assisted methods, without these it would not be possible to manage such a large quantity of imagery information in a reasonable period of time. However, certain categories of LULC, for example urban areas, are almost impossible to map using only computer-assisted image classification methods (Loveland et al., 2000, p. 1315).
- (2) In terms of the extent and the mapping scale, as with any other cartographic or geographic information, LULC maps are useful abstractions of real phenomena. The attribute and positional accuracy of these maps and geodatabases with respect to the abstracted phenomena is strongly related to the mapping scale (Chrisman, 1991), and at the same time, the chosen mapping scale depends on the context and the extent of the phenomena which are mapped. Urban land growth, for example, can be considered as a human occurrence which must be modeled at high detail scale, because the urban land units can have small sizes (facilities, parks, residential parcels, etc.), but if we intend to model the urban land growth of Europe, the scale would need to be smaller in order to allow an overview of the process across the whole continent. In addition, other elements of LULC maps, such as the number of LULC classes and the minimum mapped unit, are not independent characteristics of the maps but are closely linked to the mapping scale.
- (3) Finally, the LULC maps and geodatabase usually include several information time periods. This is one of the most important functional pieces of information provided by the LULC map or geodatabase, since observing the difference between two or more time periods allows the LULC changes recorded during this period to be calculated. Every information time period portrays the land use configuration at a single reference date (usually 1 year). In practice this single reference date may be a composite of several adjacent time periods considered to represent approximately the land use configuration shown at the given reference date. The reliability with which changes observed

across a particular time period using a LULC maps or geodatabase for two or more different dates is strongly linked to the similarity of the criteria followed to create each time period of information.

[Siedentop and Meinel \(2004\)](#) point out that the sequence of maps which comprise an LULC geodatabase has to fulfill a set of requirements, so that (1) images used for all data periods are of uniform scale, resolution, and ideally, source, (2) data collection methodology and digitization rules are the same; (3) the LULC map for the first time period should be used to produce the second, the second for the third, and so on. These authors also call attention to the need to use an image resolution appropriate to the mapping scale, and remark that an LULC map should be 'connectible with statistical data regarding population, employment, housing in order to analyze land use trends in relation to their socio-economic framework'.

In the following paragraphs we discuss the development of Madrid Land Use (MLU). MLU is a LULC set of maps and geodatabase created in order to capture land use configuration in Madrid region at high detail scale (1:10,000) for different time periods (2000, 2006, and 2009), following identical criteria throughout its development process. MLU has focused initially on urban land with the intention of improving the attribute and position accuracy provided by the European CLC dataset. MLU and CLC datasets were then compared and their differences were analyzed ([Díaz-Pacheco, 2013](#)). Subsequently, MLU was improved by adding non-artificial LULC information by introducing another LULC map from a different source. Finally, MLU was further developed to allow connection to statistical data (e.g., population data such as income, age ratios, nationality, etc.).

2. Study area

The mapped region corresponds to the Madrid Autonomous Community, an administrative region of Spain equivalent to the NUTS-2 European statistical units ([Figure 1](#)). Over the last 10 years, the Madrid region has developed in an extraordinarily dynamic way. Between 2000 and 2009, the population increased by almost 1.18 million, from 5.2 to 6.38 million inhabitants, representing demographic growth of 2.5% per year.

The expansion of urban land use in the Madrid metropolitan area during the 1990s was spectacular. Previous studies which used CLC as the LULC information source showed that urban land increased by more than 30,000 ha, an annual growth rate of 4.77%, when at this time, the population grew scarcely 0.8% a year. Furthermore, in these years the surface area under construction grew by 200% ([Hewitt & Escobar, 2011](#); [Rocha, Delgado, & Sendra, 2009](#)). This growth of urban land, in a situation of demographic stability, a result of the increase in the available built-up area per person, transforming in only 5 years (de 1996 a 2001) from 153 to 179 m² per inhabitant ([de Lucio, 2003](#)). In Spain, only some coastal cities, such as Alicante or Murcia, have had greater rates of urban land growth than Madrid.

MLU was recently compared with CLC in order to explore its limitations for monitoring urban land use dynamics ([Díaz-Pacheco, 2013](#)). This exploration noted high rates of error in the urban land use change location, fundamentally because of the scale. According to MLU, in the Madrid Autonomous Community between 2000 and 2009, the area of land dedicated to urban use grew 19.4%, at an annual rate of 2.2%. This increment has occurred at a time of population growth. In fact, the population has grown at a faster pace than the urban land use (2.5% annually) (See [Table 1](#)).

The mentioned urban expansion of Madrid has been accentuated by the implementation of a metropolitan model at every stage that is more dispersed and of lower density; this is contrary to traditional patterns of urban growth in Mediterranean cities, which are more concentrated, denser

Table 1. Evolution of the population and urban land in Madrid Region (2000-2006-2009).

	2000	2006	2009	Increment 2000– 2006	% Annual	Increment 2006– 2009	% Annual	Increment 2000– 2009	% Annual
Population	5,207,408	6,010,189	6,388,941	802,781	2.6	378,752	2.1	1,181,533	2.5
Urban Land (ha)	89,165	102,053	106,436	12,887	2.4	4,384	1.4	17,271	2.2

Source: Municipal census data and MLU.

and monocentric. Today (2013), however, in comparison with the strong dynamics of the preceding decades, the situation is quite different. The property crash has resulted in the paralysis of the majority of new residential developments, now mostly confined to small-scale urban transformations in the interior of cities. For these reasons Madrid region has become a laboratory for the observation of land use dynamics. It is crucial that robust LULC maps and geodatabases are available if past land use change in Madrid is to be properly understood. Without a proper record of past land use dynamics, it will be difficult to put in place effective and sustainable land planning policies to avoid undesirable over-development and future real estate bubbles.

3. Methods

MLU, a set of sequential LULC maps of Madrid for the years 2000, 2006, and 2009, has been created following the same criteria for the construction of each map. The LULC maps were initially developed for urban land uses; however ‘non-artificial’ LULC categories from an existing cartographic source available for 1997 were added and combined. For this reason, urban land was captured dynamically for every time period of LULC while the non-urban land (non-artificial) is static (year 1997). The LULC maps include 3 levels and 43 categories of maximum disaggregation (Table 2).

MLU has been developed up to the present time for three time periods (2000, 2006, and 2009) with a nominal reference scale of 1:10,000 and a minimal mapping unit of 100 meters (Figure 2).

The mapping process was carried out in two stages. In the first stage an urban land use map was built by classifying a mosaic of high-resolution orthorectified aerial images (0.5×0.5 m) for the year 2000. Subsequently, urban land changes during the following two periods (2006, 2009) were incorporated using the previous urban land use map in each case (2000, 2006).

Urban land use information was captured on the basis of visual detection of the urban shapes in the images, reviewing one by one the 1436 units (each unit is a square of 6.25×6.25 km²) of a lattice extended over the polygon which represents the study area (Figure 3).

The classification of the land use units was carried out by visual analysis undertaken by experts (photo-interpretation), who designed the classification decision system, also supported by field observation and the use of other local and regional cartography such as national cadastral information and local urban planning maps. Virtual sources were also employed to identify land use, such as Google StreetView (<https://maps.google.es/>) and the oblique views provided by Bing maps (<http://www.bing.com/maps/>) (Figure 4).

MLU urban land use units were connected with statistical units (census tracts), which allowed urban land use units to be divided even where they had the same land use category. This aspect notably increases the usefulness of these maps (Figure 5) for land planning since land use is in many cases an important indicator which must be combined with statistical data referenced

Table 2. LULC categories of Madrid land use.

Level 1	Level 2	Level 3
Urban land	Industrial Office and Retail Residential Multi-household Residential Single-household Urban Green Infrastructure Facilities	Industrial
		Tertiary
		Residential Multi-household
		Residential Single-household
		Urban green
		Infrastructure (transport)
		Infrastructure (energy)
		Restricted area
		Sport
		Facilities (general)
Non-Urban Land	Crops	Facilities (educative)
		Facilities (social)
		Services
		Fruit trees
		Greenhouse and artificial crops
		Olive trees
		Other crops
		Irrigated crops
		Non-irrigated crops
		Vineyards
	Degraded Areas	Dumps and landfills sites
		Empty urban parcels
		Miner extraction areas
		Construction areas
		Non-vegetated areas
		Green areas non-urban
		Pastures and grassland
		Artificial Channels
		Water reservoir
		Wetlands
	Grassland Water	River and natural water
		Sand lands
		Ilex communities
		Junipers communities
		Rockrose communities
		Mountain bushes
		Gipsyphilous bushes
		Other trees
		Other bushes
		Pine communities
	Wood and Scrub	Oak communities
		Brooms
		Rocks
		Riparian vegetation

according to census tract (population density, transport accessibility, diversity of land uses etc.). The operation to link up the statistical information is simple, and consists of considering the borders of the census tracts as the borders of the land use units. It means that the census tracts borders are always respected when the land use unit limits are traced (Figure 5).

In the second phase, LULC cartographic information was linked to the urban land use information to shape the final set of MLU maps. For this phase an existing LULC map developed by the Centre of Environmental Research (Centro de Investigaciones Ambientales, CIAM) of

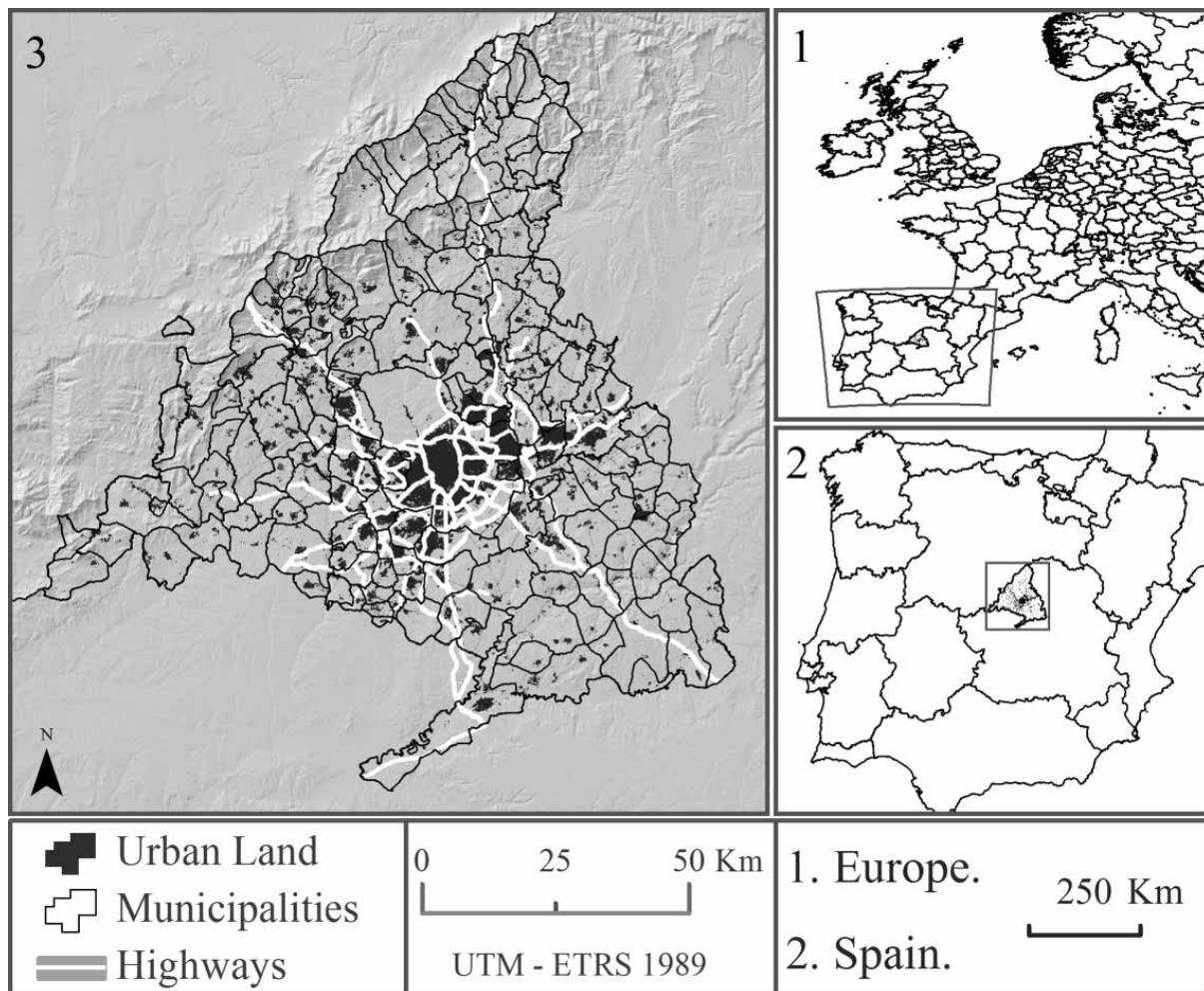


Figure 1. Location of Madrid region.

Madrid Community was used. This map had been created for the year 1997, with a reference scale of 1:50,000, and focused specifically on vegetation cover, including land uses such as crops, pasture, mineral extraction sites, etc.

The procedure employed to combine the information from both map sources comprised extraction of all the urban information from the LULC and CIAM maps. Subsequently the urban land use information created at the first stage was joined to the previous by means of overlay techniques (Figure 6).

The LULC information of CIAM was available for only one time period (1997). For this reason, in the resulting MLU-CIAM combined map urban (non-artificial land) is static while urban land is dynamic. Therefore the changes not related to urban or artificial land, i.e., forest to agriculture, a type of crop for another, a type of vegetation for another, etc. are not represented. This was not considered a problem, since the principal objective of the work was to obtain some background information about initial non-urban land use contributors to urban change, not to monitor non-urban changes over a series of time periods, as was the case for the urban land uses.

4. Discussion and conclusions

A geographical dataset comprising a set of LULC has been developed for three time periods for the Autonomous Community of Madrid. These maps can be used for analytical geographical applications (e.g. transport, population density or census-based analyses) but also can be useful

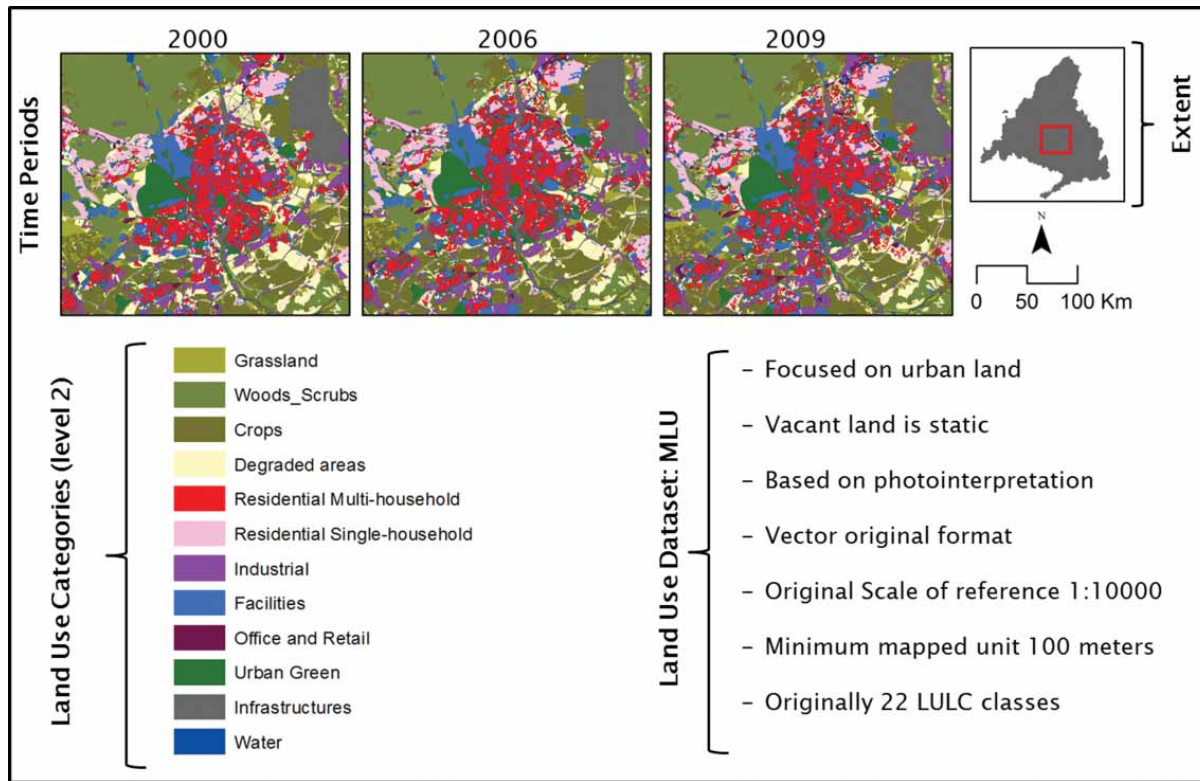


Figure 2. Characteristics of the MLU maps (level 2).

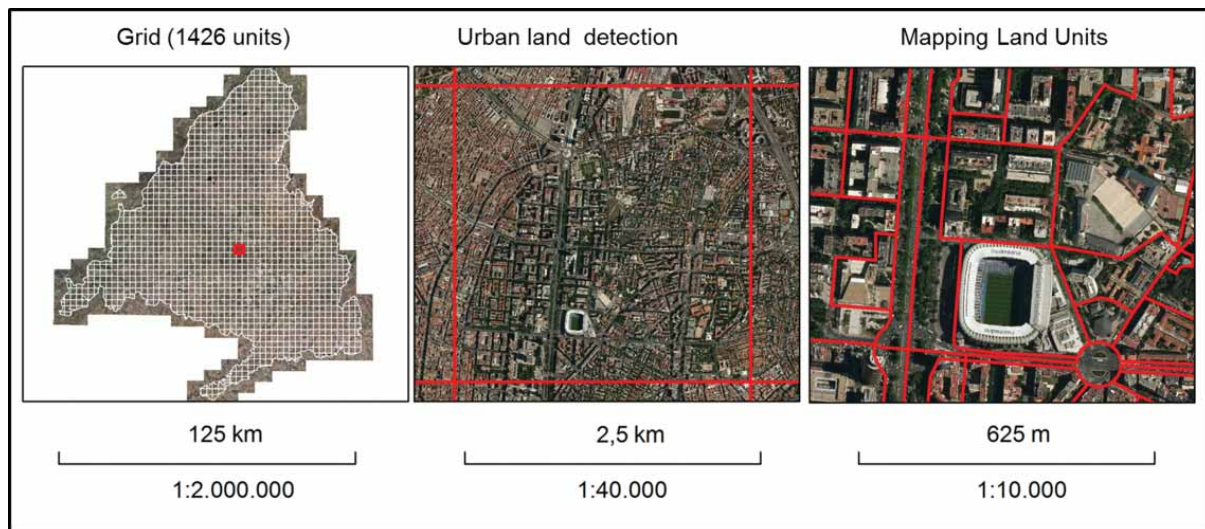


Figure 3. Procedure for land use data capture from orthophotos.

for land use modeling purposes where the configuration and distribution of land use in the Madrid region needs to be known at successive time periods.

This dataset has two important characteristics: (1) the highly detailed mapping scale (1:10,000) and (2) the connectivity between the land use information and a set of statistical units (census tracts). The large-scale employed increases the attribute and positional accuracy available for urban land use in Madrid, since the only other LULC information available for a series of time periods for Madrid is the European CLC dataset (scale 1:100,000). It has not been the intention of this work to substitute the CL as its robustness comes from the coordination

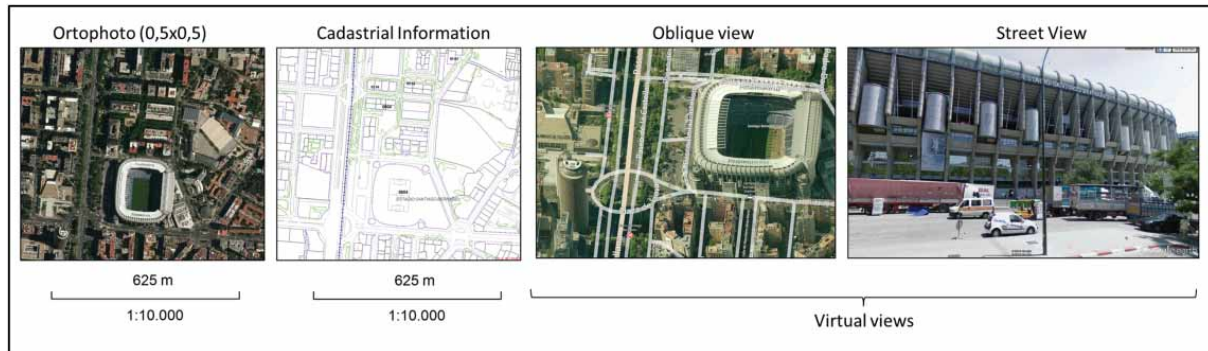


Figure 4. Support to urban land use classification.
Sources: Madrid Government, Spanish Cadastre, Bing maps, Google maps.

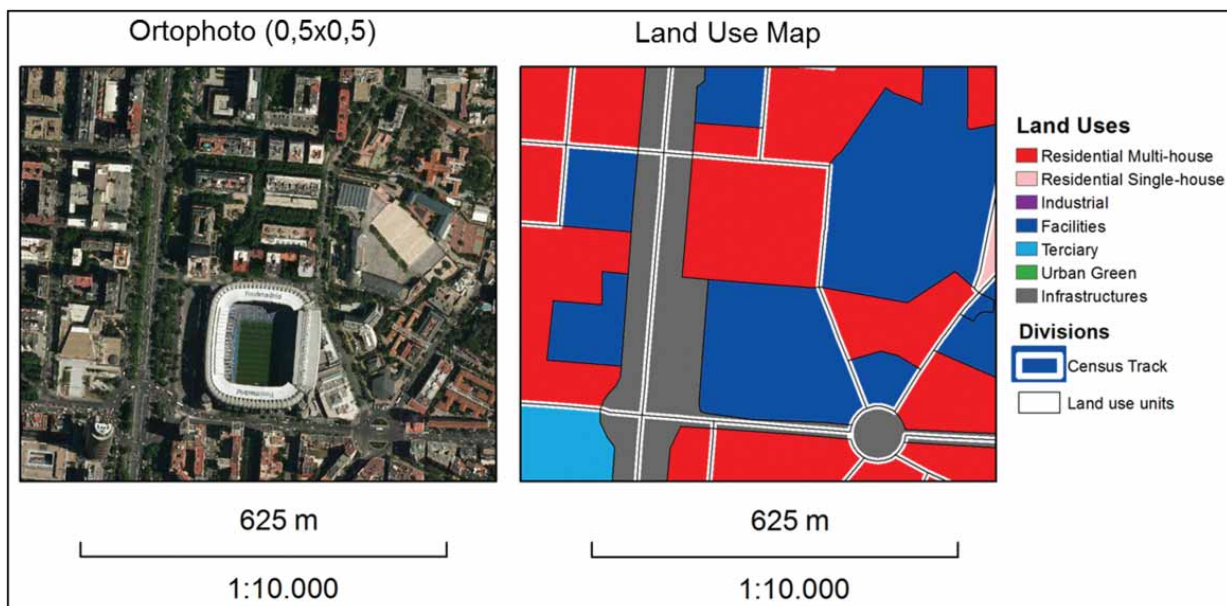


Figure 5. Land use units overlapping census tract units.
Source: MLU, Institute of Statistics of Madrid A.C.

of comparable information between European countries, but rather to supply more detailed information necessary to understand the land use dynamics of this region that has seen explosive urban expansion during the mapped period. In addition, these maps aim to satisfy the needs of the Madrid region to link land use information with statistical units such as census tract.

The MLU maps and geodatabase give direct information on land occupation, and LULC evolution between 2000, 2006, and 2009, and are able to supply very useful representations of urban land use beyond the municipal (local) scale. They are at an appropriate scale and level of detail for making planning decisions. They can support any kind of study on the environment related to land use, for example, land occupation, urban growth, and diversity of land uses. Through the use of GIS MLU also allows the use of a range of spatial analytical operations, for example, to compute dasimetric population densities or urban spatial metrics, or to carry out accessibility analysis.

MLU can also be used as a basis for dynamic models of urban LULC change such as cellular automata models (Barredo, Demicheli, Lavallo, Kasanko, & McCormick, 2004; Batty, Xie, & Sun, 1999; White & Engelen, 1993), or agent-based models (Brown, Page, Riolo, Zellner, & Rand, 2005; Veldkamp & Verburg, 2004).

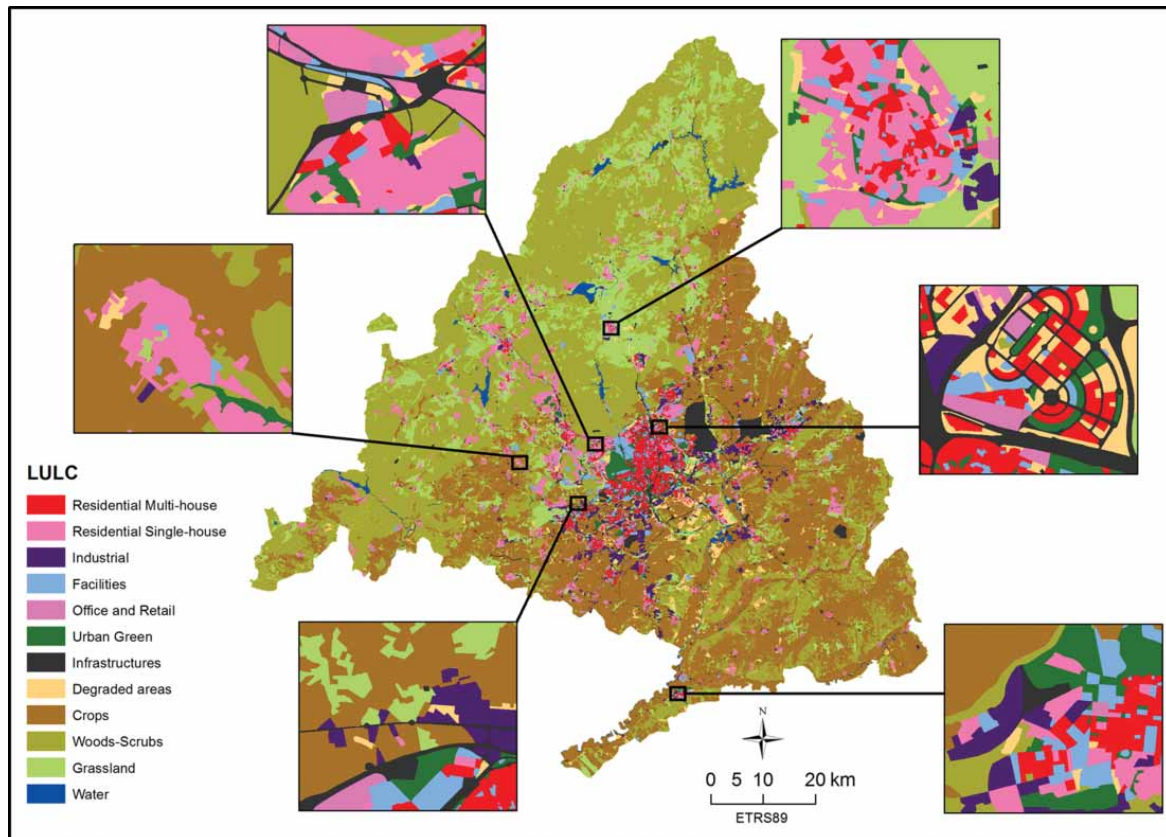


Figure 6. Sample of final composition and details at 1:50.000 of MLU (2009).
Source: MLU.

Future work is likely to include the incorporation of LULC information for new neighboring regions that are usually considered to fall under the influence of the Madrid metropolitan region, such as Toledo, Segovia and Guadalajara. It is also planned to update the land use map series by adding more recent time periods of LULC information.

Software

The construction of the maps and the treatment of the land use data and images was performed using Esri ArcGIS 10.1.

Acknowledgements

The authors want to gratefully acknowledge the collaboration of the researcher Richard Hewitt for the revision and recommendations done on this research.

References

- Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavalle, C., Kasanko, M., & McCormick, N. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: An application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B*, 31(1), 65–84.
- Batty, M., Xie, Y., & Sun, Z. (1999). Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23(3), 205–233.
- Brown, D. G., Page, S., Riolo, R., Zellner, M., & Rand, W. (2005). Path dependence and the validation of agent-based spatial models of land use. *International Journal of Geographical Information Science*, 19(2), 153–174.

- Chrisman, N. (1991). The error component in spatial data. *Geographical Information Systems*, 1, 165–174.
- Deng, X., Huang, J., Rozelle, S., & Uchida, E. (2010). Economic growth and the expansion of urban land in China. *Urban Studies*, 47(4), 813–843.
- Diaz-Pacheco, J. (2013). Exploring the Limitations of CORINE Land Cover for Monitoring Urban Land use Dynamics in Metropolitan Areas. *Journal of Land Use Science* (ahead of print), 1–17. doi:10.1080/1747423X.2012.761736
- Goldewijk, K. K. (2001). Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. *Global Biogeochemical Cycles*, 15(2), 417–433.
- Hansen, M. C., DeFries, R. S., Townshend, J. R. G., & Sohlberg, R. (2000). Global land cover classification at 1 km spatial resolution using a classification tree approach. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1331–1364.
- Hewitt, R., & Escobar, F. (2011). The territorial dynamics of fast-growing regions: Unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain. *Applied Geography*, 31(2), 650–667.
- Loveland, T. R., Reed, B. C., Brown, J. F., Ohlen, D. O., Zhu, Z., Yang, L., et al. (2000). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21(6–7), 1303–1330.
- de Lucio, R. L. (2003). Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid. *Urban*, 1(8), 124–161.
- Ménard, A., & Marceau, D. J. (2012). Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(5), 693–714.
- Rocha, W. P., Delgado, M. G., & Sendra, J. B. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990–2000). *Scripta Nova. Revista Electrónica de Geografía y Ciencias Sociales*, 13, 281–309.
- Romano, B., & Zullo, F. (2012). Land Urbanization in Central Italy 50 years of evolution. *Journal of Land Use Science* (ahead-of-print), 1–22. doi:10.1080/1747423X.2012.754963
- Samat, N. (2006). Characterizing the scale sensitivity of the cellular automata simulated urban growth: A case study of the Seberang Perai Region, Penang State, Malaysia. *Computers, Environment and Urban Systems*, 30(6), 905–920.
- Siedentop, S., & Meinel, G. (2004). *CORINE Land Cover 2000 in nation-wide and regional monitoring of urban land use and land consumption*. Paper presented at the Berlin, UBA-Texte Workshop CORINE Land cover.
- Skokanová, H., Havlíček, M., Borovec, R., Demek, J., Eremiášová, R., Chrudina, Z., et al. (2012). Development of land use and main land use change processes in the period 1836–2006: case study in the Czech Republic. *Journal of Maps*, 8(1), 88–96.
- Turner, B. L., Clark, W. C., Kates, R. W., Richards, J. F., Mathews, J. T., and Meyer, W. B. (1990). *The earth as transformed by human action: Global and regional changes in the biosphere over the past 300 years*. CUP Archive.
- Turner, B. (2001). Land-use and land-cover change: Advances in 1.5 decades of sustained international research. *GIAA-Ecological Perspectives in Science, Humanities, and Economics*, 10(4), 269–272.
- Turner, B. L., & Meyer, W. B. (1994). Global land-use and land-cover change: An overview. *Changes in Land Use and Land Cover: A Global Perspective*, 4, 3.
- Veldkamp, A., & Verburg, P. H. (2004). Modelling land use change and environmental impact. *Journal of Environmental Management*, 72(1), 1–3.
- White, R., & Engelen, G. (1993). Cellular automata and fractal urban form: A cellular modelling approach to the evolution of urban land-use patterns. *Environment and Planning A*, 25, 1175–1175.

II.1.2.-Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas



Journal of Land Use Science

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tlus20>

Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas

Jaime Diaz-Pacheco ^a & Javier Gutiérrez ^a

^a Human Geography, Complutense University, Madrid, Spain

Accepted author version posted online: 04 Jan 2013. Version of record first published: 01 Feb 2013.

To cite this article: Jaime Diaz-Pacheco & Javier Gutiérrez (2013): Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas, Journal of Land Use Science, DOI:10.1080/1747423X.2012.761736

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/1747423X.2012.761736>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae, and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand, or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

This article was downloaded by: [Biblioteca Universidad Complutense de Madrid], [Jaime Díaz-Pacheco]
On: 06 February 2013, At: 07:58
Publisher: Taylor & Francis
Informa Ltd Registered in England and Wales Registered Number: 1072954 Registered office: Mortimer House, 37-41 Mortimer Street, London W1T 3JH, UK



Journal of Land Use Science

Publication details, including instructions for authors and subscription information:

<http://www.tandfonline.com/loi/tlus20>

Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas

Jaime Diaz-Pacheco ^a & Javier Gutiérrez ^a

^a Human Geography, Complutense University, Madrid, Spain

Accepted author version posted online: 04 Jan 2013. Version of record first published: 01 Feb 2013.

To cite this article: Jaime Diaz-Pacheco & Javier Gutiérrez (2013): Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas, Journal of Land Use Science, DOI:10.1080/1747423X.2012.761736

To link to this article: <http://dx.doi.org/10.1080/1747423X.2012.761736>

PLEASE SCROLL DOWN FOR ARTICLE

Full terms and conditions of use: <http://www.tandfonline.com/page/terms-and-conditions>

This article may be used for research, teaching, and private study purposes. Any substantial or systematic reproduction, redistribution, reselling, loan, sub-licensing, systematic supply, or distribution in any form to anyone is expressly forbidden.

The publisher does not give any warranty express or implied or make any representation that the contents will be complete or accurate or up to date. The accuracy of any instructions, formulae, and drug doses should be independently verified with primary sources. The publisher shall not be liable for any loss, actions, claims, proceedings, demand, or costs or damages whatsoever or howsoever caused arising directly or indirectly in connection with or arising out of the use of this material.

Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas

Jaime Diaz-Pacheco* and Javier Gutiérrez

Human Geography, Complutense University, Madrid, Spain

(Received 29 May 2012; final version received 19 December 2012)

One of the sources of data most utilized in Europe by planners, policy makers and researchers is CORINE Land Cover (CLC) because of its wide territorial coverage. However, the users of this spatial database do not have information on its quality for analysing urban land and its evolution. This study analyses the limitations of CLC for monitoring urban land use dynamics, using Madrid Land Use as a mapping reference. This is a local geographical database with higher resolution for the Madrid region that coincides with CLC at the years of reference (2000, 2006). The results show that with respect to the total urban land area in 2000 and 2006 and the area converted to urban land between 2000 and 2006, CLC is relatively reliable. However, the confusion matrices show very high error rates, especially in dynamic analyses (changes between 2000 and 2006) and when there is differentiation between different types of land use. Researchers, planners and decision-makers should therefore exercise considerable caution when using this source for analysing urban land use and its dynamics for local approaches.

Keywords: accuracy assessment; urbanization; spatial data; land-use change; CORINE Land Cover; Europe

Introduction

The current scientific interest in understanding urban land-use dynamics is undeniable. Although only a small percentage of the earth's surface is occupied by cities (2% according to Glüser, 1994, cited in Lambin et al., 2001), the repercussions of social, economic and environmental processes that take place on urban land are felt beyond their limits. These not only affect the transformation of nearby urban-rural areas (Lambin et al., 2001) but also more distant areas. For example, the conversion of a certain number of hectares of woodland into industrial land has a direct effect locally relating to the loss of land for agroforestry in the municipality. At the same time, the so-called ecological footprint in the area is being changed (Wackernagel, 1996), which affects overall the environmental balance.

Monitoring of urban land-use dynamics is carried out using LULCC (land-use/land-cover change) geodatabases. The purpose of these databases is to provide spatially explicit information on LULCC. 'It is not sufficient to know the human-environment dynamics that will expand, shrink, or intensify a particular land use; the global change community needs to know where these changes will take place' (Turner, 2001, p. 271).

*Corresponding author. Email: jdiazpac@ghis.ucm.es

In the European Union, the most important initiative with respect to the building of an LULCC database is CORINE Land Cover (CLC). CLC has been largely used by planners, policy makers and researchers. However, there is a dearth of papers on determining the quality of CLC data for analysing urban land and its evolution. The present study systematically examines the accuracy of CLC with respect to the analysis and dynamics of urban land use. This entails carrying out comparative analyses of CLC with another more precise geographical database on a larger scale developed for the Madrid region, known as Madrid Land Use (MLU). The quality of the CLC data is measured by means of error matrices, using MLU as reference mapping.

This article is structured in six sections. This introduction is followed by the second section, which presents a literature review on LULCC geodatabases and their usefulness for monitoring urban land-use dynamics. The third section gives a brief description of the area of study, justifying its suitability with respect to the objectives of the study. The fourth section describes the sources and methodology used. The fifth section shows the results and the sixth section describes the main conclusions.

LULCC geodatabases and their use for observing changes in urban land use

Approaches to land transformation research have been based on two elements of analysis that are interrelated but different, namely, land use and land cover. The term land use denotes the human employment of the land, including settlement, cultivation, pasture, rangeland, recreation and so on, while land cover denotes the physical state of the land that involves, for example, the quantity and type of surface vegetation, water and earth materials (Turner & Meyer, 1994). Land use and land cover are strongly interconnected. In fact, physiognomic characteristics of landscape objects cannot be quite separated from their functional properties. For instance, urbanized features (artificial surfaces) or intensively used agricultural features (arable land, permanent crops) also indicate the social function of the land use (Feranec, Hazeu, Christensen, & Jaffrain, 2006).

The observation of LULCC dynamics has been carried out on different spatio-temporal scales. Global evaluations of aggregate information based on assumptions and simple models are not spatially explicit, while the specificity of local or regional evaluations is difficult to extrapolate to global areas (Turner et al., 1995). Geographers and natural scientists in particular have led the way to developing spatially explicit models of land-use change at highly disaggregate scales (Irwin & Geoghegan, 2001).

LULCC geodatabases for monitoring land-use change dynamics on a global scale

The most prominent global initiatives with a broad temporal retrospective are the ‘Land-Use and Land-Cover Change (LULCC)’ project, jointly developed by the International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP) and the International Human Dimensions Programme on Global Environmental change (IHDP), aimed at achieving a ‘better understanding of land-use and land-cover changes (e.g. degradation, desertification, biodiversity loss)’ (Turner et al., 1990, cited in Goldewijk, 2001, p. 417), and the History Database of the Global Environment (HYDE), aimed at obtaining patterns of population distribution and land use for the last 300 years (Goldewijk, 2001). Like HYDE, LULCC also sets out to examine how land cover has been changed by human land use over the last 300 years, with a view to being able to model future changes over the next 50–100 years.

One of the LULCC geodatabases used in the projects mentioned is the IGBP DISCover (International Geosphere-Biosphere Programme, Data and Information Systems Initiative),

developed by researchers from the US Geological Survey (USGS) at the University of Nebraska-Lincoln and the European Commission Joint Research Centre in Ispra (Italy). This geodatabase has a global land-cover resolution of 1 km. It 'provides a unique view of the broad patterns of the biogeographical and ecoclimatic diversity of the global land surface, and presents a detailed interpretation of the extent of human development' (Loveland et al., 2010, p. 1303).

Both the global environmental monitoring programmes and the LULCC geodatabases mentioned above work very well for analysing phenomena to the detail that the accuracy of their scales allows. This means that when it comes to monitoring changes in urban land use, only regions with high urban dynamics can be detected. With respect to the IGBP DISCover database, attention has already been drawn to the fact that due to the heterogeneous nature of urban land use it is 'practically impossible to map urban land cover using computer-assisted image classification methods' (Loveland et al., 2010, p. 1315).

LULCC geodatabases for monitoring land-use change dynamics at European level

In the European Union, the most important initiative regarding the building of a database on land occupation is the CLC. This geodatabase has been widely used for analysing and monitoring urban land use. For example, Tinh, Arlt, Heber, Hennersdorf, and Lehmann (2002) used CLC for measuring the degree of compactness of cities; Fuller and Gaston (2009) focused their analysis on the evolution of urban green space, comparing 386 European cities; Guérois and Pumain (2008) tried to extract models of urban occupation from a comparative study of 40 cities in different European regions by measuring urban gradients from a central core and Hewitt and Escobar (2011) used CLC to study the growth of urban use on areas of agricultural land near Madrid.

This database has been used for observing changes in land use, in addition numerous studies have confirmed its usefulness for supporting environmental and socioeconomical analyses of very diverse characteristics. CLC has been used for observing pollution in the 'Statistical air pollution interpolation model, RIO' project (Janssen, Dumont, Fierens, & Mensink, 2008, p. 4884), for drawing up dasymetric maps of population density to exclude non-populated areas from analysis and obtain accurate geodemographic data (Gallego & Peedell, 2001; Bielecka, 2005), for supporting econometric calculations on environmental costs, relating mobility with urban morphology (Camagni, Gibelli, & Rigamonti, 2002) and for developing agro-environmental indicators (EEA, 2001).

As can be seen from the studies mentioned, CLC has covered the need to add spatial information to the study of dynamic processes of change in land use and related phenomena. However, the users of these data do not generally have information regarding the quality of CLC. Very few studies have been done on trying to determine the degree of accuracy or quality of results based on CLC and none of these has specifically dealt with the uses of urban land. Siedentop and Meinel (2004) compared CLC 2000 with another land-use database with higher spatial resolution and concluded that CLC could be used as a complementary database in urban land-use monitoring programmes. However, the 'masking' of small-scale development runs a risk of underestimation of sprawl dynamics. Thus, for local approaches, CLC 2000 cannot provide a meaningful database (Siedentop & Meinel, 2004). Bach et al. (2006) compared CLC with a field inventory of two districts in Germany and with another two land-use layers to evaluate the accuracy and congruency of these digital land-use maps. Catalá, Bosque, and Plata (2008) tried to detect possible errors in CLC using a simple cross tabulation procedure between 1990 and 2000, in which land-use changes considered unusual were located and analysed. The study concluded that

68% of the ‘unusual’ changes detected are related to assignation errors in land cover/use mapped. Our paper extends the previous work on the quality of CLC for monitoring urban land- use dynamics. Like in Siedentop and Meinel (2004) and Bach et al. (2006), the quality of CLC data is determined by comparison with a local and more reliable data source. However, unlike these studies, analysis is carried out by means of error matrices, which is both static and dynamic and differentiates different classes of urban land.

Area of study

The area selected for study is the Madrid region, chosen not only because of the availability of spatial data and statistics but, above all, for the diversity of its urban spaces and the great dynamism that this region experienced during the period of change analysed in this study (2000–2006). The Madrid region covers 8004 km², divided into 179 municipalities (Figure 1). It has a total of six million inhabitants, half of whom live in the Madrid municipality (Table 1). This region has experienced an extraordinary dynamism in recent years. Between 2000 and 2006, its population rose by almost one million from 5.2 to 6 million

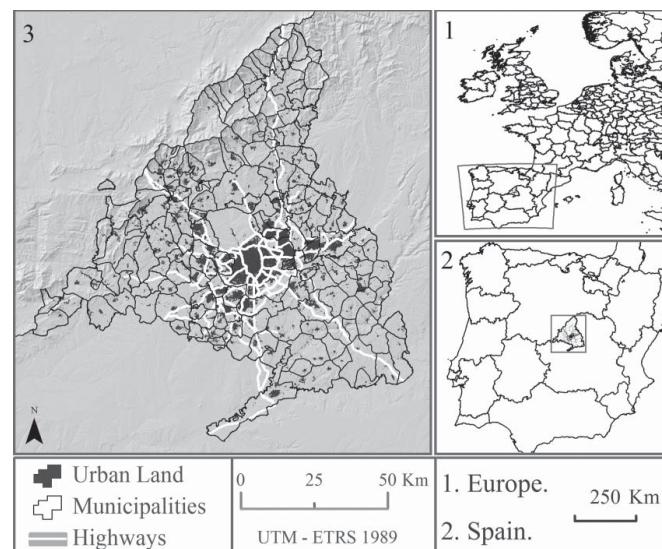
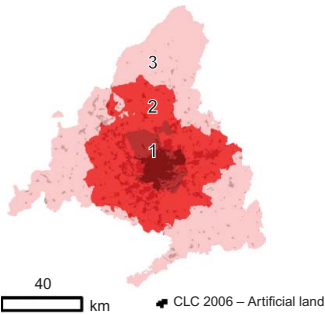


Figure 1. Region of Madrid, municipalities, urban land and road network.

Table 1. Population growth in the Madrid region by rings.

Madrid region	Rings	2000	2006	Difference (Abs.)	Difference (%)
	(1) Municipality of Madrid	2,882,860	3,128,600	245,740	8.5
	(2) Suburban municipalities	1,806,396	2,136,315	329,919	18.3
	(3) Hinterland	516,152	743,268	227,116	44.0
	Total	5,205,408	6,008,183	802,775	15.4

Source: Statistics Institute of the region of Madrid.

inhabitants, an increase of 15.4%. The main areas of absolute growth were found in the ring of suburban municipalities. In relative terms, growth was greater in the more peripheral rings. This dispersion of the population was also accompanied by an intense process of job decentralization.

This population dynamics has been accompanied by a considerable expansion of urban land. Between 2000 and 2006, almost 15,000 ha was converted to urban land. This meant a relative growth of 17.4%, which was higher than the population growth (15.4%). New developments were therefore not only more peripheral but also less dense.

The expansion of urban land has been highly influenced by distance from the city centre and by the road network, especially high-capacity roads around which most new development has taken place. The motorway network has a radio-concentric pattern: 12 radial motorways converge on the Madrid municipality, and this is encircled by three orbital motorways which link the radial roads to each other (Figure 1).

Sources and methodology

Sources

In order to analyse the limitations of CLC for studying urban land-use dynamics, the MLU geodatabase, with its higher resolution and greater accuracy, has been taken as mapping reference.

CLC is a European project managed by the EEA (European Environmental Agency). Its function is to collect, coordinate and homogenize information on the state of the environment and natural resources in the European Union (resolution CE/338/85, 27 June 1985). The main objective of the project is to collect land-use/land-cover data and homogenize the data-gathering processes for the whole European territory. This allows comparable data to be used to apply policies and environmental protection criteria to all countries taking part in the project.

Until now, CLC has been carried out for three years: 1990, 2000 and 2006. The CLC scale is 1:100,000. The building of this geodatabase is based on two processes: on the one hand, satellite and image processing; on the other hand, interpretation and mapping through the integration of automatic classification methods and remote sensing with subsequent visual interpretation, generally known as computer-assisted photo-interpretation (EEA, 2000).

In its addendum 2000, the CLC technical guide (EEA, 2000) warns that there are certain limits to this semiautomatic process of generating spatial information. First, one should be aware that the image quality and contents can vary due to factors such as atmospheric conditions, technical image quality and relief. Second, the differences between land cover, *sensu stricto*, and functional intrusion from land use make it difficult to set up such an automated conversion. Third, there is an essential difference between pixel-based classification and human holistic interpretation capacity. The latter can map spatial organization of pixels to higher level spatial patterns or objects and allows pixels to be grouped into heterogeneous or composite CLC classes. Bearing the above in mind, it is clear that, with close monitoring of the conversion process, one can obtain valuable CLC results (EEA, 2000).

For its part, the MLU contains information on urban land use in the Madrid region for 2000, 2006 and 2009. Data were collected on a highly detailed scale, with the basic reference scale for mapping established as 1: 10,000 and the minimum mapping unit being 1 ha. As the technical processes did not include automatic or computer-assisted classification

tasks, these were carried out entirely by photo-interpretation of high-resolution (0.5 m) aerial orthophotographs, supported by large-scale cartographic and cadastral information (1:5000 and 1:1000, respectively). MLU has been repeatedly checked and validated by experts in land-use change in Madrid. For these reasons, MLU clearly represents a better available cartographic data set for Madrid urban land use. It is also true that MLU focuses only on land use and does not mix land use and land cover like CLC.

Methodology

In order to compare CLC and MLU, the artificial land classification of each of the two sources was analysed. In level 3 of class 1 (artificial land), CLC has 11 categories (continuous urban fabric, discontinuous urban fabric, industrial or commercial units, road and rail networks and associated land, port areas, airports, mineral-extraction sites, dump sites, construction sites, green urban areas and sport and leisure facilities). MLU, however, classifies urban land use into 12 categories (residential multi-household, residential single-household, industrial, educational facilities, public health facilities, other facilities, office and retail, services, infrastructures, urban green, sport and leisure and airports).¹ The creation of new classes containing the categories of both data bases was found to be possible and this led to the categories being reclassified (Table 2). By means of this process of harmonization, a new classification was obtained that enabled both data bases to be compared. The new classification consisted of seven classes of urban land use (urban residential, industrial/commercial/services, infrastructure, airports, sport and leisure, urban green and non-urban land) (Table 2).

The effects of the use of different scales (CLC, 1:100,000; MLU, 1:10,000) on data quality can quickly be deduced from a simple visual analysis of a detail of the information on land use from each of the sources in accordance with the new classification (Figure 2). The limits of the mapped elements are less precise with CLC (see, for example, the airport). The CLC polygons classed as urban residential mask small elements of other uses (for example, urban green or industrial/commercial/services) because the minimum mapping unit for CLC is 25 ha. On the other hand, transport infrastructures are under-represented

Table 2. Harmonization of CLC and MLU urban land classes.

Level 3 CLC classes (Class 1)	New classes (Harmonization)	MLU classes
Continuous urban fabric	Urban Residential	Residential multi-household
Discontinuous urban fabric		Residential single-household
Industrial and commercial units	Industrial/Commercial/ Services	Industrial
		Office and retail facilities
		Services
Road and rail network and associated land	Infrastructure	Infrastructure
Airports	Airports	Airports
Sport and leisure facilities	Sport & Leisure	Sport and leisure facilities
Green urban areas	Urban Green	Urban green
Dump sites	Non-Urban Land	Non-urban land
Construction sites		
Mineral-extraction sites		
Other non-urban land		

Source: CLC, MLU.

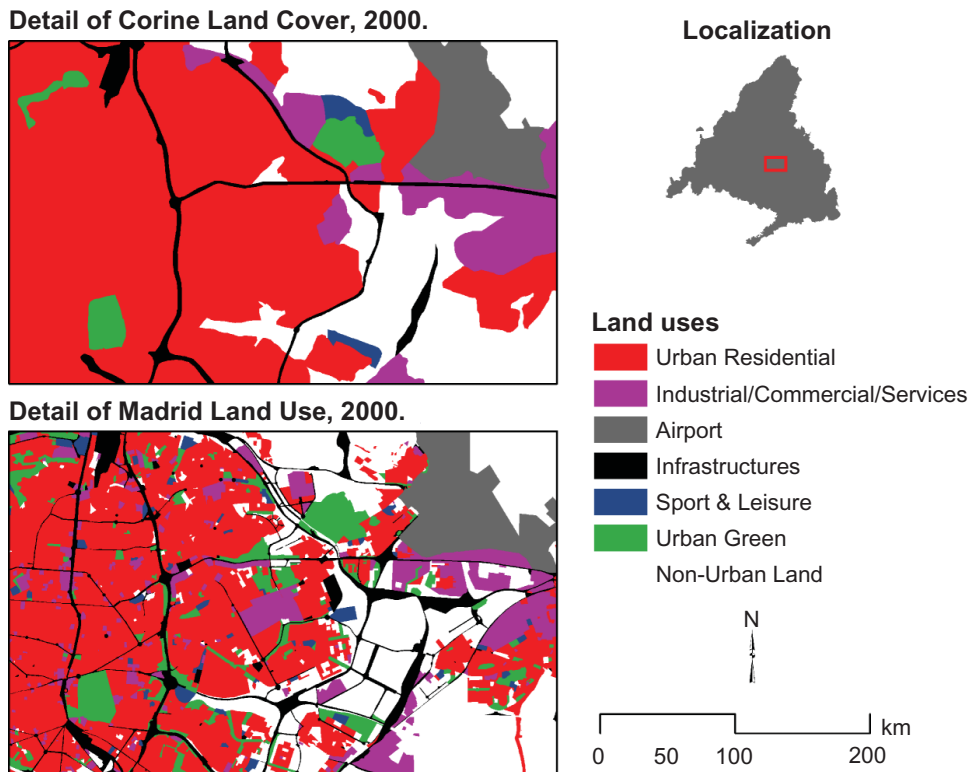


Figure 2. Detail of urban land use according to CLC and MLU, 2000. Sources: CLC, MLU.

with CLC because of specific digitization rules for transport infrastructure (>100 m wide). The effects of scale and cartographic generalization are also clearly seen when changes to urban land between 2000 and 2006 according to CLC and MLU are compared (Figure 3).

In order to assess CLC data quality during the monitoring of urban land-use dynamics, MLU is used as a mapping reference. The first step is to calculate the area of urban land (in total and by class) according to each of the databases in 2000 and 2006. To evaluate the accuracy of CLC, the layers are overlain: CLC2000 and MLU2000 layers on the one hand, and CLC2006 and MLU2006 layers on the other.

A similar analysis is then carried out on changes in land use between 2000 and 2006. The data layer of CLC2000/2006 changes (land-cover changes between the years 2000 and 2006) is generated by overlaying the CLC2000 and CLC2006 data layers. Similarly, the data layer of MLU2000/2006 changes is generated by overlaying the MLU2000 and MLU2006 data layers. The area that changes to urban between 2000 and 2006 (in total and by class) is calculated according to each source (CLC2000–2006 and MLU2000–2006). The accuracy of the CLC2000/2006 changes is measured in relation to the mapping reference (MLU2000/2006). To do this, both data layers of changes are overlain.

Confusion matrices are used to evaluate the spatial coincidence of the elements classified in CLC with respect to those in MLU. This comparison is generally made with raster layers, so counts are done by pixels. In this case, as the two databases were in vectorial format, it was decided to maintain this format to avoid introducing another source of error (vector-raster conversion). The comparison was therefore done directly in hectares. In these confusion matrices, the rows correspond to the mapping to be evaluated and the columns to the reference mapping (in our case, CLC and MLU, respectively).

The values of the main diagonal of the matrices represent the area that coincides spatially in both layers. For example, in Table 5, there was a spatial coincidence of

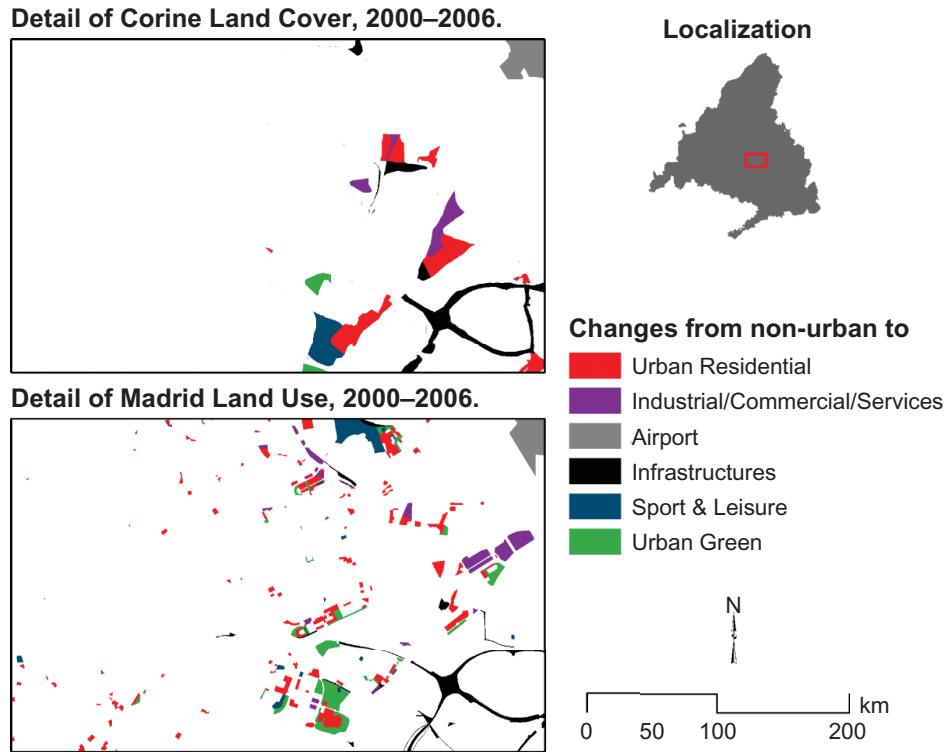


Figure 3. Detail of changes to urban land between 2000 and 2006 according to CLC and MLU. Sources: CLC, MLU.

2489 ha for ‘Airport’ land use between the two databases in 2000. Values outside this diagonal represent the area that does not coincide spatially for each land use. For example, 361 ha classified by CLC in 2000 as ‘Airport’ correspond in reality to the ‘Industrial/Commercial/Services’ class according to MLU (commission error); inversely, 165 ha that CLC classifies as ‘Industrial/Commercial/Services’ in 2000 really correspond to the ‘Airport’ class according to MLU (omission error). The commission error column shows these errors as percentages of the total area classified by CLC in that class, whereas in the omission error row they are shown as a percentage of the real area of that class according to MLU (mapping reference). Thus, for example, 25.7% of the total area classified by CLC as ‘Airport’ really corresponds to other classes (commission errors), and 12.9% of the area actually occupied by the ‘Airport’ class has not been classified as such by CLC (omission errors).

The overall classification accuracy for each year is computed by dividing the sum of all the correctly classified hectares (diagonal of the confusion matrix) by the total number of hectares in the confusion matrix. This value tends to overestimate classification accuracy, since it overlooks the proportion of random agreement between data sets (Congalton & Green, 1999). Because of this, the kappa coefficient was also computed. This is basically the proportion of agreement after chance agreement has been excluded (Kiage, Liu, Walker, Lam, & Huh, 2007).

Results

Urban land-use analysis for 2000 and 2006: CLC vs. MLU

First, the urban land area was calculated for both sources of data. As Table 3 shows, CLC registers 1424 ha less urban land than MLU in 2000 and 2946 ha less than MLU

Table 3. Urban land area by use (ha) according to CLC and MLU (ha).

	CLC	MLU	Differences	Differences (%)
Land use (2000)				
Airport	3350	2858	492	17.2
Sport & Leisure	2490	3325	−835	−25.1
Industrial/Commercial/Services	14,189	14,343	−154	−1.1
Infrastructure	5348	7761	−2413	−31.1
Urban Residential	56,087	51,842	4245	8.2
Urban Green	3607	6366	−2759	−43.3
Total	85,071	86,495	−1424	−1.6
Land use (2006)				
Airport	5201	5650	−449	−7.9
Sport & Leisure	3186	3900	−714	−18.3
Industrial/Commercial/Services	14,578	16,947	−2369	−14.0
Infrastructure	8459	10,197	−1738	−17.0
Urban Residential	63,894	57,766	6128	10.6
Urban Green	3906	7710	−3804	−49.3
Total	99,224	102,170	−2946	−2.9

Source: MLU, CLC.

in 2006. This means that CLC is relatively reliable when it comes to finding the total amount of urban land, as this amount is underestimated by only 1.6% for 2000 and 2.9% for 2006.

The differences between CLC and MLU in calculations of the area for each urban use reflect what is expected with relation to CLC digitization rules; it is because of these rules (minimum mapping unit and mapping specific digitization rules for transport infrastructure) that CLC overestimates areas of residential use and tends to underestimate areas with other urban uses (Table 3 and Figure 2).

Table 3 details the amount of area occupied by urban land and its breakdown by class, but no information is given on the thematic accuracy of the elements mapped by CLC. To obtain this information for each reference year (2000 and 2006), the two geodatabases (CLC and MLU) were overlain, and the results obtained were analysed using confusion matrices, which revealed the extent to which CLC coincides spatially with the reality expressed by MLU as mapping reference.

Table 4 shows the 2000 and 2006 confusion matrices, with urban land and non-urban land being the only classes considered. Overall classification accuracy was relatively high (95.4% and 95.6%, respectively). However, these values are greatly influenced by the high number of hectares in the non-urban class. When adjusted for chance agreement, kappa statistic values are considerably lower (0.76 and 0.80, respectively). There is quite a high rate of commission and omission errors. Of the hectares classified by CLC as urban in 2000, 20.7% (17,640 ha) were actually non-urban (commission error), while 22.0% (19,067 ha) of the hectares that were really urban were classified as non-urban by CLC (omission error). In 2006, there were rather fewer commission and omission errors (16.2% and 18.6%, respectively). The difference between commission and omission errors explains the underestimation of CLC urban land shown in Table 3 (1424 ha in 2000 and 2946 ha in 2006).

Table 5 shows the confusion matrices differentiating urban land uses. The kappa values (0.69 in 2000 and 0.73 in 2006) are lower than those registered in Table 4 (0.76 and 0.80, respectively) because of the breakdown of urban land by class. The

Table 4. Confusion matrix of CLC and MLU (reference mapping): urban land vs. non-urban land 2000 and 2006 (ha).

	MLU (reference mapping)		Row total (ha)	Commission error (%)
	Urban	Non-Urban		
CLC (2000)				
Urban	67,431	17,640	85,071	20.7
Non-Urban	19,067	696,235	715,299	2.7
Column total (ha)	86,495	713,875	800,370	
Omission error (%)	22.0	2.5		
Overall accuracy = 95.4				
Overall kappa statistics = 0.76				
CLC (2006)				
Urban	83,132	16,092	99,224	16.2
Non-Urban	19037	682,108	701,146	2.7
Column total (ha)	102,169	698,201	800,370	
Omission error (%)	18.6	2.3		
Overall accuracy = 95.6				
Overall kappa statistics = 0.80				

Source: CLC, MLU.

commission and omission error rates are very high. Commission errors are higher than 40% in the Sport & Leisure, Industrial/Commercial/Services and Infrastructure classes; omission errors are higher than 50% in these same classes and in the Urban Green class.

As expected, there are more omission errors than commission errors in most of the classes (Sport & Leisure, Industrial/Commercial/Services, Infrastructure, Urban Green), but the opposite is true for Urban Residential and Non-Urban classes. This is because areas belonging to the above land uses are more likely to be mapped by CLC as Urban Residential or Non-Urban than for the opposite to occur. For example, of the 56,089 ha that CLC maps as Urban Residential in 2000, 1179 ha are really Sport & Leisure, 2529 Industrial/Commercial/Services, 2110 Urban Green and 1138 Infrastructure (commission errors), whereas in the opposite direction errors are only 295, 1600, 287 and 385 ha, respectively (omission errors).

There are basically two sources of error that explain the lower accuracy of CLC with respect to MLU. The first is the 1:100,000 digitization scale: the limits of the CLC polygons do not coincide exactly with those of MLU (taking the latter as the real limits of the mapped elements). This affects both commission and omission errors. The second source of error derives from the digitization rules and affects omission errors more than commission ones. Small polygons (<25 ha) of Sport & Leisure, Urban Green, Industrial/Commercial/Services and Infrastructure (<100 m wide) classes are not explicitly mapped by CLC, which includes them in the Urban Residential and Non-Urban classes. CLC does not give sufficient detail on urban areas because it includes small polygons of different uses in the Urban Residential category and does not register small-scale developments (sprawl) in non-urban areas. The first does not affect the total calculation of urban land, but the second leads to urban land being underestimated in CLC, something already detected in Table 3.

Table 5. Confusion matrix of CLC and MLU (reference mapping): urban land classes 2000 and 2006 (ha).

	MLU (reference mapping)								Row total (ha)	Commission error (%)
	Airport	Sport & Leisure	Industrial/ Commercial/ Services	Infra-structure	Urban Residential	Urban Green	Non-Urban			
CLC (2000)										
Airport	2489	0	361	24	28	0	449	3350		25.7
Sport & Leisure	2	1275	70	9	295	151	688	2490		48.8
Industrial/Commercial/ Services	165	177	6997	655	1600	270	4325	14,189		50.7
Infrastructure	2	37	289	2915	385	154	1566	5348		45.5
Urban Residential	72	1179	2529	1138	39,074	2110	9986	56,087		30.3
Urban Green	0	52	54	71	287	2516	627	3607		30.2
Non-Urban	129	604	4044	2949	10,174	1165	696,235	715,299		2.7
Column total (ha)	2858	3325	14,343	7761	51,842	6366	713,875	800,370		
Omission error (%)	12.9	61.6	51.2	62.4	24.6	60.5	2.5			
Overall accuracy = 93.9										
Overall kappa statistics = 0.69										
CLC (2006)										
Airport	4594	0	360	22	19	0	206	5201		11.7
Sport & Leisure	2	1636	122	29	493	204	701	3186		48.7
Industrial/Commercial/ Services	128	218	8700	718	1672	323	2819	14,578		40.3
Infrastructure	94	38	419	4528	498	210	2671	8459		46.5
Urban Residential	72	1417	2811	1374	46,393	2744	9082	63,894		27.4
Urban Green	0	67	69	117	243	2797	613	3906		28.4
Non-Urban	760	524	4465	3410	8446	1432	682,108	70,1146		2.7
Column total (ha)	5650	3900	16,947	10197	57,766	7710	69,8201	80,0370		
Omission error (%)	18.7	58.1	48.7	55.6	19.7	63.7	2.3			
Overall accuracy = 93.8										
Overall kappa statistics = 0.73										

Source: CLC, MLU.

Measuring the CLC capacity and accuracy to detect changes from non-urban to urban land uses

One of the uses of LULCC geodatabases is monitoring of the expansion of urban land. This subsection assesses the capacity of CLC to calculate the total area of land converted from non-urban to urban in the period under analysis (2000–2006) and measures the accuracy of CLC for locating these changes. First, measurements of land-use changes were taken with CLC2000–2006 and MLU2000–2006. Second, the two layers of changes in land use (CLC2000–2006 and MLU2000–2006) were overlain in order to obtain confusion matrices, using MLU as mapping reference.

The total number of hectares converted to urban land between 2000 and 2006 was somewhat higher with CLC (16,401) than with MLU (15,094) (Table 6). However, the differences vary in the different classes. For example, changes to Urban Residential are overestimated by CLC, as they include small polygons that in reality change to other urban uses, such as polygons in the Industrial/Commercial/Services class, which are logically underestimated by CLC. More surprising are changes to the Infrastructure class, which are overestimated by CLC. This is due to the fact that roads built between 2000 and 2006 in the area under study were mainly high-capacity roads and these are represented with excessive width, precisely by CLC, because of the size of the pixels, resulting in an overestimation of the area that converted to this class between the two dates. Changes in the Airport class are due to the expansion of Madrid-Barajas airport and were represented differently by CLC and MLU: CLC demarcated the runway area, whereas MLU also mapped other new tracts of land destined for airport use (Figure 3).

The confusion matrix for CLC and MLU contributes complementary information on changes from non-urban to urban land (Table 7). According to CLC, 16,427 ha was converted from non-urban to urban, while MLU registered 15,809 ha. Greater differences are found in changes in the opposite direction, that is, from urban to non-urban land use; for example, what was an industrial complex in 2000 was in the process of demolition in 2006. By their very nature, changes of this type are uncommon in land-use evolution. CLC calculates 2.275 ha as against the 135 ha for MLU (Table 7). Most of these unusual changes in CLC are therefore attributable to errors. If this type of change is also considered (Table 7), the net increase in urban land would be 14,152 ha according to CLC (16,427 – 2275) and 15,675 ha (15,809 – 135) according to MLU, consistent with the data in Table 3.

There is little divergence between the two sources in the total number of hectares that change to urban land, but this becomes much greater when locational accuracy for changes in urban land use is measured. The commission error rises to 58.0% and the omission error

Table 6. Changes from non-urban to urban land uses between 2000 and 2006 according to CLC and MLU.

Land use change (2000–2006)	CLC	MLU	Differences	Differences %
Airport	2059	2763	–704	–25.5
Sport & Leisure	821	549	272	49.5
Industrial/Commercial/Services	1834	2669	–835	–31.3
Infrastructures	3001	2392	609	25.5
Urban Residential	8237	5467	2770	50.7
Urban Green	449	1254	–805	–64.2
Total	16,401	15,094	1306	8.7

Source: CLC, MLU.

Table 7. Confusion matrix of CLC and MLU (reference mapping): changes from non-urban to urban land use 2000–2006 (ha).

Changes 2000–2006 CLC:	MLU (reference mapping):				Row total (ha)	Commission error (%)
	Non-urban – Urban	Urban- Urban ^a	Urban – Non-Urban	No change		
Non-Urban – Urban	6.892	21	6	9.509	16.427	58.0
Urban – Urban ^a	650	9	1	2.396	3.055	99.7
Urban – Non-Urban	64	0	15	2.195	2.275	99.3
No change	8.202	112	113	770.186	778.613	1.1
Column total (ha)	15.809	141	135	784.285	800.370	
Omission error (%)	56.4	93.8	88.8	1.8		
Overall accuracy = 97.4						
Overall kappa statistics = 0.39						

Note: ^aChanges between classes of urban land use (for example, from Industrial/Commercial/Services to Urban Residential).

Source: CLC, MLU.

to 56.4% (see Table 7). These errors are much higher than those registered in the static analysis (Table 4), due to the fact that the polygons that change to urban land are much smaller than the 2000 and 2006 urban land polygons.

The confusion matrix considering different uses of urban land (Table 8) offers an overall kappa statistic of only 0.40 and very high rates of commission and omission errors for almost all classes. With the exception of the Airport class, these are all above 50%. As occurs in the static analysis, commission error (74%) is greater than omission error (60.9%) in the Urban Residential class. In addition to digitization errors attributable to the CLC scale, it should also be taken into consideration that in this class CLC includes small polygons that change to other non-urban land classes, such as Industrial/Commercial/Services (commission errors), and that it does not show small developments of less than 25 ha (omission errors). On the other hand, with respect to static analysis, the opposite occurs in the Infrastructure class, that is, commission error (64.8%) is greater than omission error (55.8%). Land bordering high-capacity roads is mapped as Infrastructure by CLC, when, for the most part, it really belongs to the No Change class (commission errors). There are also new infrastructures (like the R2 motorway) that have not been registered by CLC (omission errors). A significant proportion of the changes to Sport and Leisure included in CLC are really changes to Urban Green. Changes to the Urban Green class are not very reliable and here the rate of spatial coincidence between the two sources is very low, not only because of the small size of these polygons but also because of the unreliability of identifying these land areas from satellite images.

Final remarks

The world LULCC geodatabase capacity for monitoring the expansion of urban land is obviously limited. Its scope goes no further than locating areas on a planetary scale where extensive changes towards artificial structures take place. The building of databases on a regional scale, at scales of 1:200,000 or more, as in the case of CLC, has allowed researchers to fill a significant gap in spatial information in studies related to urban land-use dynamics. However, more detailed spatial information on urban land use is required for local studies, with scales even lower than 1:25,000. The mapping of land use on this

Table 8. Confusion matrix of CLC and MLU (reference mapping): changes from non-urban to urban land classes 2000–2006 (ha).^a.

Changes 2000–2006 CLC:	MLU (reference mapping):							
	Airport	Sport & Leisure	Industrial/ Commercial/ Services	Infrastructure	Urban Residential	Urban Green	No Change	Row total (ha)
Airport	1857	0	4	0	0	0	199	2059
Sport & Leisure	0	171	15	8	84	102	441	821
Industrial/Commercial/ Services	0	10	602	28	20	10	1163	1834
Infrastructure	92	0	16	1057	34	1	1800	3001
Urban Residential	0	52	157	126	2140	228	5534	8237
Urban Green	0	0	0	19	31	27	372	449
No Change	815	315	1874	1154	3159	885	770,186	778,388
Column total (ha)	2763	549	2669	2392	5467	1254	779694	794,789
Omission error (%)	32.8	68.8	77.4	55.8	60.9	97.8	1.2	
Overall accuracy = 97.6								
Overall kappa statistics = 0.40								

Note: ^aThis table does not include changes between land use classes (for example, from Industrial/Commercial/Services to Urban Residential).
Source: CLC, MLU.

scale is already being carried out in the European Union, with a minimum unit of detail of 0.25 ha for all the large metropolitan areas in the EU. However, as this mapping currently contains only one temporal reference, it cannot be used to analyse urban growth at present.

Some cities, like Madrid, have geographical databases with high spatial resolution for different years. The fact that the Madrid database (MLU) has temporal moments coinciding with CLC (2000 and 2006) makes it possible to assess the limitations of CLC for monitoring urban land. This analysis may be of interest to cities in which high-resolution mapping on land use for different years is unavailable, obliging them to use sources with lower resolution, like CLC.

The analyses carried out on the Madrid region show that CLC gives relatively accurate results with respect to the total amount of urban land, both in 2000 and 2006, with underestimations in the order of 2–3%. When the different classes of urban land are differentiated, the results are logically less accurate because of CLC digitization rules: CLC overestimates total urban land area by around 10% and underestimates other categories somewhat more, generally by 10–30%.

The confusion matrices reveal that the spatial coincidence of urban land use between both databases is around 80%. There are rather more omission errors than commission errors, which is consistent with the CLC scale and its digitization rules. CLC does not show small developments of less than 25 ha and linear infrastructures less than 100 m wide. However, when classes of urban land are differentiated, the error rate is considerably higher, generally between 20% and 60%. There are more omission errors than commission errors for most of the classes, but the opposite occurs in the Urban Residential and Non-Urban classes. This is basically due to the fact that, because of its scale, CLC includes small polygons in Urban Residential or Non-Urban areas that really belong to other classes, such as Industrial/Commercial/Services, Infrastructure or Urban Green.

Results obtained in the dynamic analysis (changes to urban use) are discouraging. There is not much divergence between the two sources in the total number of hectares that change to urban land, but the confusion matrix shows higher rates of error than those registered in the static analysis. This is because the polygons changing to urban land are much smaller than urban land polygons in 2000 and 2006. In fact, the commission error rate rises to 58.0% and that of the omission error to 56.4%. When urban land classes are differentiated, errors are greater and more asystematic.

There is no doubt CLC provides highly valuable information on land use and its evolution in European Union countries. Its average scale (1:100,000) is suitable for analysing land-use dynamics at national or even regional level. Its use is inappropriate, however, for local studies on urban land use. In the Madrid region, the results of CLC over the total urban land area in 2000 and 2006 and on the area converted to urban between 2000 and 2006 are relatively accurate. Nevertheless, the confusion matrices show very high error rates, especially in dynamic analyses (changes between 2000 and 2006) and when the different urban land uses are differentiated. Care should be taken in generalizing the Madrid region results to other regions. Given the results obtained in this study, it follows that researchers, planners and decision-makers are recommended to proceed with caution when using this source for analysing urban land use and its dynamics for local approaches.

Acknowledgements

MLU geodatabase was built by researchers from the Department of Human Geography, Universidad Complutense de Madrid with financial support from the Ministerio de Ciencia e Innovación (project TRA2008-06682).

Note

1. Unlike CLC, MLU focuses on differentiating the uses of urban land. This means that artificial structures that are not explicitly of an urban nature, such as dumps, areas of mineral extraction or construction sites, are identified only as 'non-urban land' and no further classification is made.

References

- Bach, M., Breuer, L., Frede, H. G., Huisman, J. A., Otte, A., & Waldhardt, R. (2006). Accuracy and congruency of three different digital land-use maps. *Landscape and Urban Planning*, 78, 289–299.
- Bielecka, E. (2005). A dasymetric population density map of Poland. In *Proceedings of the 22nd Cartographic International Conference*, La Coruña, Spain.
- Camagni, R., Gibelli, M. C., & Rigamonti, P. (2002). Urban mobility and urban form: The social and environmental costs of different patterns of urban expansion. *Ecological Economics*, 40, 199–216.
- Catalá, R., Bosque, J., & Plata, W. (2008). Análisis de posibles errores en la base de datos CORINE Land Cover (1990–2000) en la comunidad de Madrid. *Estudios Geográficos*, 69, 81–104.
- Congalton, R. G., & Green, K. (1999). *Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices*. Boca Raton, FL: Lewis.
- EEA. (2000). *CORINE Land Cover technical guide – Addendum 2000* (Technical Report No. 40). Copenhagen: EEA.
- EEA, Eurostat, DG Agriculture, DG Environment, and Joint Research Center. (2001). *Towards agri-environmental indicators: Integrating statistical and administrative data with land cover information* (p. 6). Copenhagen: EEA.
- Feranec, J., Hazeu, G., Christensen, S., & Jaffrain, G. (2006). Corine Land Cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia). *Land Use Policy*, 24, 234–247.
- Fuller, R., & Gaston, K. (2009). The scaling of green space coverage in European cities. *Biology Letters*, 5, 352–355.
- Gallego, J., & Peedell, S. (2001). *Using CORINE Land Cover to map population density* (p. 6). Copenhagen: EEA.
- Goldewijk, K. (2001). Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database. *Global Biogeochemical Cycles*, 15, 417–433.
- Guérois, M., & Pumain, D. (2008). Built-up encroachment and the urban field: A comparison of forty European cities. *Environment and Planning A*, 40, 2186–2203.
- Hewitt, R., & Escobar, F. (2011). The territorial dynamics of fast-growing regions: Unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain. *Applied Geography*, 31, 650–667.
- Irwin, E. G., & Geoghegan, J. (2001). Theory, data, methods: Developing spatially explicit economic models of land use change. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85, 7–24.
- Janssen, S., Dumont, H., Fierens, F., & Mensink, C. (2008). Spatial interpolation of air pollution measurements using CORINE Land Cover data. *Atmospheric Environment*, 42, 4884–4903.
- Kiage, L. M., Liu, K.-B., Walker, N. D., Lam, N., & Huh, O. K. (2007). Recent land-cover/use change associated with land degradation in the Lake Baringo catchment, Kenya, East Africa: Evidence from Landsat TM and ETM+. *International Journal of Remote Sensing*, 28, 4285–4309.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., . . . Xu, J. (2001). The causes of land-use and land-cover change: Moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11, 261–269.
- Loveland, T., Reed, C., Brown, J., Ohlen, D., Zhu, Z., Yang, L., & Merchant, J. (2010). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1303–1330.
- Siedentop, S., & Meinel, G. (2004). CORINE Land Cover 2000 in nation-wide and regional monitoring of urban land use and land consumption. In *UVA-Texte. 04/04 ISSN 0722-186X, Workshop CORINE Land Cover 2000* (pp. 162–169). Berlin: Leibniz-Institut für Ökologische Raumentwicklung e.V.
- Thinh, N. X., Arlt, G., Heber, B., Hennersdorf, J., & Lehmann, I. (2002). Evaluation of urban land-use structures with a view to sustainable development. *Environmental Impact Assessment Review*, 22, 475–492.

- Turner, B. (2001). Land-use and land-cover change: Advances in 1.5 decades of sustained international research. *GAIA*, 10, 269–272.
- Turner, B., & Meyer, W. (1994). Global land-use and land-cover change: An overview. In W. Meyer, B. Turner (Eds.), *Changes in land use and land cover: A global perspective* (pp. 3–10). Cambridge: Cambridge University Press.
- Turner, B., Skole, D., Sanderson, Sc., Günther, F., Fresco, L., & Leemans, R. (1995). *Land-use and land-cover change* (IGBP/HDP report). IGBP/HDP, 35/7.
- Wackernagel, M. (Ed.). (1996). *Our ecological footprint: Human impact on the earth*. Gabriolia Island, BC: New Society.

II.1.3.-Urban sprawl in the Mediterranean urban regions in Europe, and the crisis effect on the urban land development: Madrid as study case.

Hindawi Publishing Corporation
Urban Studies Research
Volume 2014, Article ID 807381, 13 pages
<http://dx.doi.org/10.1155/2014/807381>



Research Article

Urban Sprawl in the Mediterranean Urban Regions in Europe and the Crisis Effect on the Urban Land Development: Madrid as Study Case

Jaime Díaz-Pacheco and Juan Carlos García-Palomares

Departamento de Geografía Humana, Universidad Complutense de Madrid, C/ Profesor Aranguren, s/n, 28040 Madrid, Spain

Correspondence should be addressed to Jaime Díaz-Pacheco; jdiazpac@ucm.es

Received 14 May 2014; Revised 1 October 2014; Accepted 15 October 2014; Published 26 November 2014

Academic Editor: David Wong

Copyright © 2014 J. Díaz-Pacheco and J. C. García-Palomares. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The middle of 2007 saw the beginning of a worldwide financial crisis that led to a sharp reduction in investment based on construction and urban development. This new situation is generating a new process, characterised by a slowdown that has almost reached a standstill when compared with the frenzied development of previous decades. In order to analyse these processes, this study examines urban land use changes and the urban growth rate and spatial dynamics of the metropolitan region of Madrid. The analysis has been carried out on a large scale between two periods (2000–2006 and 2006–2009) using a regional land use geodatabase. The results show the changes in the urban land use dynamics that took place over these two periods that could characterise the cities of Mediterranean Europe, where contrarily to the general pattern in Europe built-up areas are combining scattered built-up areas with new aggregated compact developments.

Research Article

Urban Sprawl in the Mediterranean Urban Regions in Europe and the Crisis Effect on the Urban Land Development: Madrid as Study Case

Jaime Díaz-Pacheco and Juan Carlos García-Palomares

Departamento de Geografía Humana, Universidad Complutense de Madrid, C/ Profesor Aranguren, s/n, 28040 Madrid, Spain

Correspondence should be addressed to Jaime Díaz-Pacheco; jdiazpac@ucm.es

Received 14 May 2014; Revised 1 October 2014; Accepted 15 October 2014; Published 26 November 2014

Academic Editor: David Wong

Copyright © 2014 J. Díaz-Pacheco and J. C. García-Palomares. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The middle of 2007 saw the beginning of a worldwide financial crisis that led to a sharp reduction in investment based on construction and urban development. This new situation is generating a new process, characterised by a slowdown that has almost reached a standstill when compared with the frenzied development of previous decades. In order to analyse these processes, this study examines urban land use changes and the urban growth rate and spatial dynamics of the metropolitan region of Madrid. The analysis has been carried out on a large scale between two periods (2000–2006 and 2006–2009) using a regional land use geodatabase. The results show the changes in the urban land use dynamics that took place over these two periods that could characterise the cities of Mediterranean Europe, where contrarily to the general pattern in Europe built-up areas are combining scattered built-up areas with new aggregated compact developments.

1. Introduction

Intensification of urbanization across all regions of the globe, together with the greater ease of cartographic land use data handling through GIS and remote sensing techniques, have led to a proliferation of these kinds of studies in recent years. Analysis of urban expansion in cities in the developing world has become more and more frequent [1–5]. Likewise research on the rapid growth of Asian cities is becoming increasingly abundant (see [6, 7] or [8]). In Europe, the studies which deal with urban sprawl approaches are prevalent. In many cases, especially in Mediterranean regions, this kind of approach is habitually faced from a dualistic perspective, that is, transition from compact to more dispersed growth models, associated with phases of sprawl (see, e.g., [9–17]).

Nevertheless, urban expansion is characterized by a high degree of complexity [18]. It does not occur in all regions at the same degree, at the same pace, or in the same way. Rather, it must be approached and understood taking into account specific geographical and historical contexts in which particular urban forms shape cities [19]. For this reason some

authors note that difficulties that may arise when attempting to study urban growth based on concepts and, above all, indicators, from North American paradigms. Jiang et al. [8] observe that sprawl indices applicable elsewhere may not be directly applied to the Chinese context. In Mediterranean cities, Catalán et al. [19] have warned that urban trends do not necessarily follow the North-American model and outcomes may differ with respect to the situation found on the other side of the Atlantic. The polarization that this implies would seem to need a critical reconsideration of the problem. In particular, to investigate whether some kind of hybrid process of urban change can be identified in European and, more specifically, Mediterranean, cities.

The impact of the severe economic crisis that began in 2007 should also be considered, as its effects have been particularly drastically felt in Mediterranean countries. The crisis has not braked the metropolitan expansion, but it has affected the model of the city itself. In Spanish cities, whose model of growth has been heavily dependent on construction sector, the crisis has evidently put a stop to urban growth. In addition, however, as Florida [20] has emphasized, the

crisis has presented an opportunity to revisit recent developments offering more sustainable urban developments. That is, between other things, more compact urban developments with suitable densities of population which endow a fair space for inhabitants, not wasting the land, a high diversity of land uses and urban designs which permits high ratios of sustainable mobility, less based on car commuting and oriented to the public transport.

This work aims on one hand, to assess the urban land use patterns, trends, and the evolution of Madrid during the first decade of the XXI century, as an European Mediterranean metropolitan region in the context of the urban sprawl, over all linked to the residential developments. In that sense this study shows parallelisms with other similar urban development models that have already been pointed out for other European urban regions like Barcelona or Athens [19, 21], which sustain the existence of a kind of a hybrid urban model (between the *hyper-sprawled cities* and *compact cities*). On the other hand, the present work attempts to evince the change experienced on the urban growth trends for the mentioned European urban regions in relation with the recent crisis that is hitting Europe (since 2007).

This study analyzes the evolution of the metropolitan area of Madrid and its land use dynamic over the last decade (2000–2009). The work deals with a period and a metropolitan region of great interest. The accelerated construction dynamic known as the “*tsunami urbanizador español*” (Spanish urbanization tsunami) of the 1990s [22] was accentuated by the implementation of a metropolitan model at every stage more dispersed and of lower density between 2000–2006. This model was characterized by an accelerated urban land dynamic where the low interest rates of the loans encouraged the projects related with the land market. The urban growth model was not only linked to the economic model, but the Spain economy was strongly supported by the urban and infrastructures developments. During the period 1995–2008 were built in Spain more than 6 million of dwellings at the same time that the land increased three times its price, and the property loans were multiplied by ten. The credit flowed from all the corners of the planet which caused a strong indebtedness in all the sectors but especially into the domestic economies [23].

After 2006, the situation is quite different. The property crash has resulted in the paralysis of the majority of new residential developments, now mostly confined to small-scale urban transformations in the inner-city areas. The debt crisis and the public deficit have shut down investment in new infrastructure and services and direct changes associated with both of these have disappeared accordingly. At the same time, the difficult situation in which private investors and businesses find themselves puts a brake on the emergence of new activity on the city’s outskirts, precisely those areas that were so dynamic in the preceding decade.

The growth of the European cities during the preceding decade could be insignificant since a global perspective and taking into account the extraordinary urbanization rates in China, India, Brazil, and the traditional mega-cities of North-America and Japan. Nonetheless, detailed studies of the urban

land expansion and its structure into the European context and more specifically on a Mediterranean urbanization framework can help to understand the urban transformation during the preceding decade.

The work presented here was undertaken using land use maps for the Madrid region for the years 2000, 2006, and 2009. This cartographic dataset, denominated “*Madrid Land-Use*” (MLU), is a large scale (1:10,000) land use database showing a high level of detail and was developed by the research team through photographic interpretation. The well-known Corine Land Cover (CLC) database, which covers most European Union countries and some adjacent states, for example, Turkey, available from the European Environment Agency (EEA), offers land use and land cover information at a maximum scale of 1:100,000 and at present covers the periods 1990, 2000, and 2006.

Moreover, CLC is one of the most frequently used sources for analysis of land use in Europe (see, e.g., [15, 16, 24–27]). It also has the advantage of being developed in coordination between participating countries, something that lends it great value in making comparisons between European regions with respect to land use and land cover change. Nevertheless, when more precise knowledge of land use change is required from the point of view of urban land occupation at a regional scale, databases such as MLU aim to fill this vacuum by providing urban land use information only obtainable at scales of detail in excess of 1:10,000 through exhaustive analysis based on photointerpretation.

This paper is divided into six sections. Following this introduction, in Section 2 there is a brief literature review about the urban sprawl; then, the city of Madrid is presented as the study area in Section 3. In Section 4, the data and methodology used in the analysis are introduced, together with discussion of the contribution of this work in the light of previous research. In Section 5, the results are presented; changes in land use, dynamics of dispersal, and fragmentation, and changes in net population densities that have come about as a result. Finally, in Section 6, a discussion of the results is given and the principal conclusions are presented.

2. A Brief Literature Review of the Urban Sprawl in the European Context

Urban sprawl has long been key topic in geography and other disciplines [28]. Urban sprawl is characterized by single family dwellings, lending uniformity to the urban landscape, reducing metropolitan density, and leading to fragmentation of urban spaces [29–31]. This kind of growth is not only a major driver of environmental change [32, 33] but also reaps high economic and social costs [34, 35]. The most abundant work in this area being above all that dedicated to recognizing the emergence of urban sprawl through various methods along with comparison of the phenomenon between cities (e.g., [11, 36–41]).

Sprawl is a term hard to pin down and not easy to measure, but currently there is certain scientific agreement and a recognition of its negative effects on sustainability, from the urban planning agencies. Gillman [38] was not far to make a good description of sprawl when affirmed that the “sprawl”

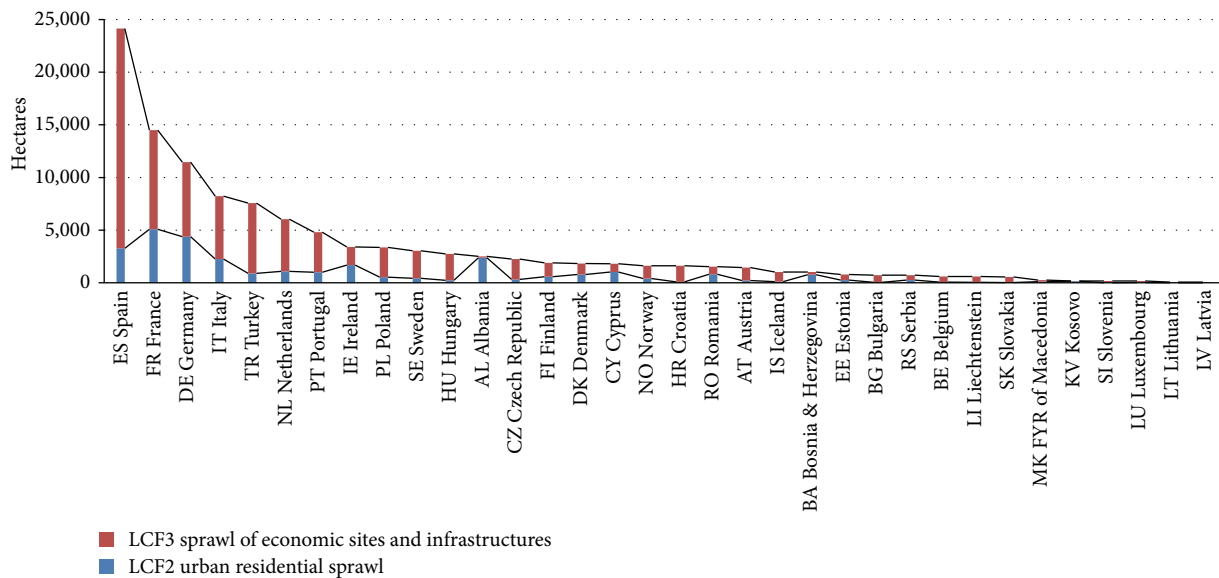


FIGURE 1: Urban sprawl in Europe (2000–2006). Source: [42].

shows itself startlingly clear from the jet plane window at thirty thousand feet: “huge expressways snake out over the land, generating a wide, loosely formed network across the world below” [38, page 13]. Sometimes, these kinds of appreciations are more understandable than a set of measures on densities, geometric shapes, diversity of land uses, spatial statistics, or landscape metrics. Nonetheless, numbers are extremely necessary following the planning management principle that “we cannot manage what we do not measure.” Urban sprawl needs, as many other human phenomena, from both approaches to be explained, the qualitative and the quantitative, in order to cover all the characteristics to be identified.

Urban sprawl seems to be a common feature of the metropolitan suburban areas in the last twenty years in the European Union. The EU cities, following distantly the North American metropolis like Los Angeles or the urbanized Northeastern Megalopolis of the United States [43] are timidly reproducing the extended, discontinuous, low-density, and fragmented spaces in the periphery of the city centre. The immediate consequences of this type of urban forms are those related with the transport, where the flow networks, more complex and disperse, make longer the travel distances and the trip times, producing an excess on commuting [44].

The sprawl is characterized by an extended low-density urban land use pattern, mostly residential, and covering a vast number of hectares, in order to supply the demand of these housing developments associated to the new commercial forms of the city, the malls. The residential developments spread into a competition by the land taking with the agriculture activity and natural areas and produce the irreversible transformation of the cropland, pastures, and forests. Nonetheless, the extensive land taken is not the only socioeconomic and environment impact that has been pointed out for the urban sprawl. A lack of scale economies,

that make more complicated the public services distribution; all those derivate effects from the overload of the private cars transit, like the increase of the energy consumption or the air pollution; and the shocks in the ecosystems are caused by the scattered urban development [45].

Although the sprawl phenomenon is relatively new in the so-called “Mediterranean European compact cities,” nowadays it becomes unavoidable to describe their urban landscape [46]. The Joint Research Centre brought out a report in 2006 very concerned about the urban sprawl in Europe through analysis made over the MOLAND database at local scale and CORINE Land Cover database at European level. In this report the sprawl is described as “*the physical pattern of low-density expansion of large urban areas[...]. Development is patchy, scattered and strung out, with a tendency for discontinuity[...]. Full of empty spaces that indicate the inefficiencies in development and highlight the consequences of uncontrolled growth*” [10]. In the same direction, the UN-HABITAT on its “State of the World’s Cities 2012–2013” report has pointed out the advantages of the compact urban development, contrary to the unsustainable urban sprawl which produces higher infrastructure costs, worst access to services and facilities, and a major social segregation [47, page 94].

For the period 2000–2006, CLC indicates that the urban sprawl keeps being extremely important in Europe and especially remarkable in Spain where this phenomenon was more intense for economic sites and infrastructures (Figure 1).

In this work, as it will be explained in the methodology section, we deal with the urban sprawl over all in terms of residential net densities and measuring the size of the new urban patches and the distance between them.

3. Study Area

The study area corresponding to the Madrid Autonomous Community is divided for administrative purposes into 179

TABLE 1: Evolution of the population in the Madrid Autonomous Region between 2000 and 2009.

Rings	Number of municipalities	Population			Changes 2000–2006	Changes 2006–2009	Changes 2000–2009
		2000	2006	2009	% annual	% annual	% annual
1 (Madrid Municipality)	1	2,882,860	3,128,600	3,255,944	1.4	1.3	1.4
2 (suburban area)	27	1,806,396	2,136,315	2,273,355	3.0	2.0	2.9
3	37	243,436	379,613	447,037	9.3	5.0	9.3
4	37	141,735	196,425	221,206	6.4	3.7	6.2
5	36	101,339	128,577	146,612	4.5	4.1	5.0
6	41	29,642	38,653	42,778	5.1	3.2	4.9
Total	179	5,207,408	6,010,189	6,388,941	2.6	2.0	2.5

Source: Municipal Census Data. Madrid.

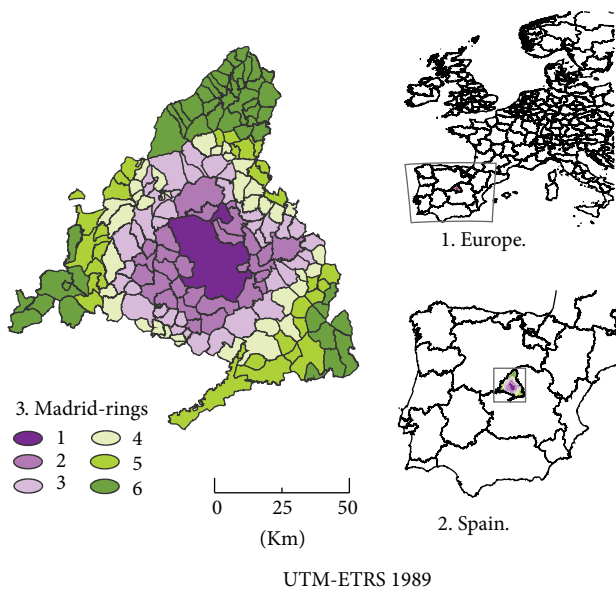


FIGURE 2: Location of the Madrid region, showing rings and municipalities.

municipalities (Figure 2). In 2009, the total population was 6,390,000 million inhabitants, half of whom lived in the central city (Madrid municipality) (Table 1). In the last 10 years, the Madrid region has developed in an extraordinarily dynamic way. The principal growth in absolute terms has occurred in the first ring of suburban municipalities and in the core city itself, indicating the demographic recovery of these areas, which saw population decline in the 1990s. However, in relative terms, demographic growth seemed to be proportionately greater in the more distant rings of the outer city. This dispersion of population was accompanied by a process of employment decentralization.

The expansion of urban land use in the Madrid metropolitan area during the 1990s was spectacular in the European context. According to CLC, urban land increased by more than 30,000 ha, an annual growth rate of 4.77%, when the population grew scarcely 0.8% a year. Furthermore, in these years the surface area under construction grew by 200% [25, 26]. In Spain, only some coastal cities have had

greater rates of urban land growth than Madrid [48]. The European Environment Agency signalled the Madrid region as one of the European Union's urban growth hotspots [10].

This dynamic of land use growth was related to a legislative framework which facilitated the entry of vast quantities of land onto the market. Municipal administrations, by way of land planning instruments, discovered a licit method of financing and economic reactivation that made possible the sale of great quantities of land [49, 50]. The existence of investment capital and in many cases, the gamble taken by the construction sector in terms of a marked focus toward real estate, translated, in the Spanish case, into unprecedented urban expansion.

The growth of built-up areas has been characterized by the growth of residential land, above all by the more dispersed and lower density urban development patterns. The CLC database shows that, between 1990 and 2000, the compact residential areas category grew 13%, while the dispersed urban areas category (open urban structures and detached urban areas with or without gardens) grew 42.5%. Aside from the residential spaces, land related to economic activities also grew strongly. Industrial land grew 107% and became each time more strongly characterized by location on the city's fringes and strongly related to the development of the road network (see [26]). Moreover, between 1990 and 2000, new urban development's showed little diversity of uses, a characteristic of more compact developments.

For the period 2000–2006, CLC indicates that the urban sprawl keeps being extremely important in Europe and especially remarkable in Spain where this phenomenon was more intense for economic sites and infrastructures (Figure 1).

Madrid region is a good example of the above pointed out urban sprawl dynamic in Europe and at the beginning of the present century the intensity of changes in this metropolitan area has provoked a real economic, sociodemographic and morphological metamorphosis in a short space of time. Nevertheless, its recent evolution shows changes to this dynamic, and the outbreak of the economic crisis in EU and more accentuated in the European Southern region, where according to the IMF, their GDP per capita will be lower in 2017 than it was in 2007 [51]. It presupposes a new wave of change, but this time of different nature. By understanding the compression of cause and effect of these

processes through analysis of land use change in the Madrid region can also help to explain similar urbanization processes that have taken place throughout Mediterranean cities.

4. Data and Methodology

In Europe the majority of the analysis of land use dynamics is carried out using Corine Land Cover (CLC) cartography. The advantage of CLC is the possibility it offers for comparison of land use dynamics across the various European regions that have participated in the project (see, i.e., [52–54]). In the Madrid region, CLC has been employed to explain land use evolution [25, 26], the explanatory factors behind such evolution, and the ways to obtain predictive models for exploring the future land use evolution [27].

Nevertheless, CLC presents problems relating to its application in analysis of urban dynamics, fundamentally due to the scale at which the work was carried out. Catalá et al. [55] have detected errors using cross-tabulation analysis between 1990 and 2000, localizing and analyzing “unusual” changes. This study concludes that 68% of these unusual changes correspond to errors in category assignment for land use/land cover mapped. On the other hand, Feranec et al. [56] have identified underestimations in the analysis of land use change 1990–2000 due to the amalgamation of the residual parts of polygons smaller than 25 ha with neighbouring polygons.

In order to overcome the problems with CLC, this work uses the MLU mapping, which relates to urban land use in the Madrid region in 2000, 2006, and 2009. MLU differentiates 7 urban land classes on the level 2 of disaggregation, which is used at the present work: 2 residential classes (multi-household and single-household), industrial, office and retail, facilities, urban green, and infrastructures. Data capture was carried out at a high level of detail, the basic scale of reference for the digitization work being 1:10:000, with 100 m² as the minimum mapped unit. The technical procedure did not include any kind of automatic or computer-aided classification, being carried out in its entirety by photointerpretation of high resolution (0.5 m) aerial orthophotos, with the support of topographic map information for the Community of Madrid (scale 1:1000) as well as cadastral maps (1:5000) [57]. By comparing CLC and MLU mapping using confusion matrices Díaz-Pacheco and Gutiérrez [58] have found that the spatial coincidence of urban land use between each data base is around 80%.

Geographical Information Software (GIS) was used to analyze the land use changes. Land use gains and losses were analyzed, both at a general level and according to rings representing distances from the core city (every 10 km).

With the aim of analysing the impact of the new low density development types, net population densities were calculated using the total population at municipal level and the surface area of urban residential land use, both single and multihousehold. Additionally, in order to measure the degree of fragmentation amongst land uses, landscape metrics were applied, for example, the number of patches of different uses, their average size, or the distances between the new urban land use patches those already existing (see [59, 60] or [24]).

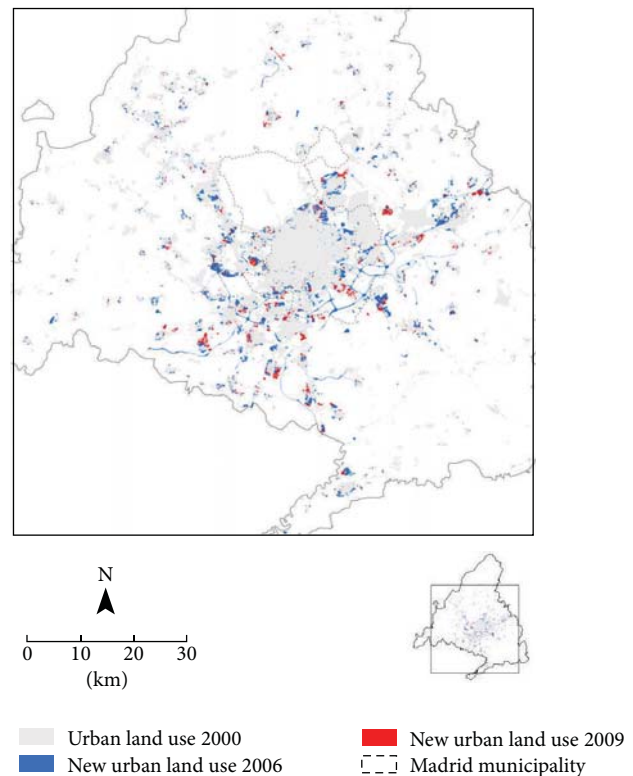


FIGURE 3: Evolution of urban land, 2000–2009. Source: Madrid Land-Use (MLU).

Finally, maps were calculated showing kernel densities for change areas. These maps allow the reasoning behind the location of the most dynamic areas to be identified and the new central focus points in the periurban areas to be located [8].

5. Results

5.1. A Slowdown of the Urban Expansion? Between 2000 and 2009, urban land use grew 19.4%, at an annual rate of 2.2% (Figure 3, Table 2). This increase has occurred at a time of population growth. In fact, the population has grown at a faster pace than the urban land use (See Table 1). The annual growth rate for urban land uses from 2000 to 2006 was 2.4%, with a clear deceleration from 2006 onwards (a rate of 1.4% annually).

These data break with the tendency for the consumption of artificial land per person to grow observed in the preceding decades. For the first time in many years, the available built up area per inhabitant declined, from 171.2 m²/inhabitant in 2000, to 169.8 in 2006 and 166.6 in 2009 (this increase in urban land, at a time of demographic stagnation, meant a notable increase in the built-up area available to each person, which in only five years (1996 to 2001) went from 153 to 179 m² per inhabitant [61]).

By classes, the residential land use occupies almost 50% of the total artificial land. Within the residential class, single-household dwellings already characterize the majority

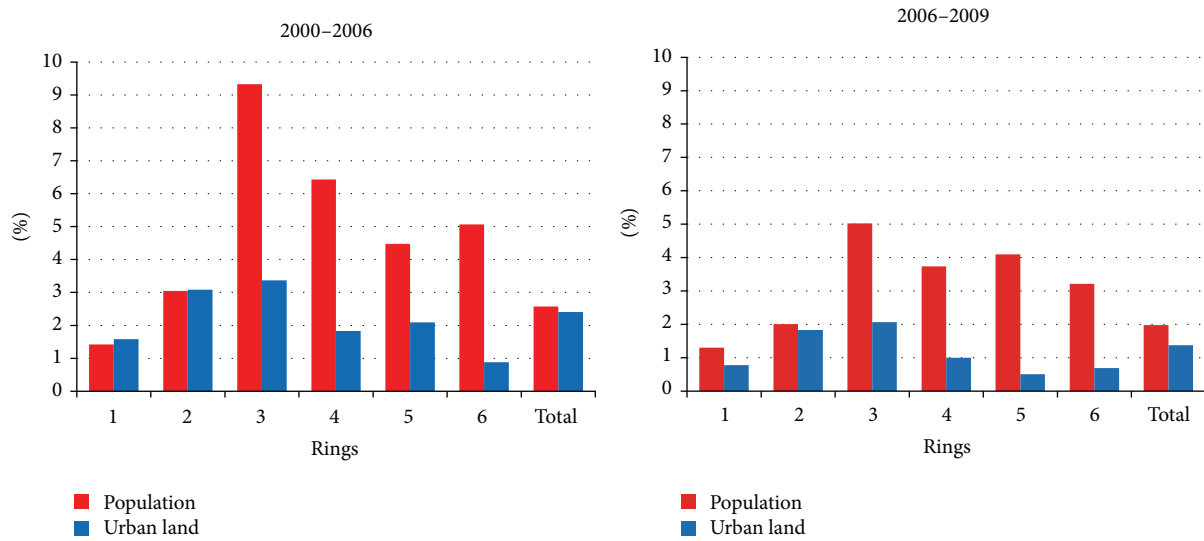


FIGURE 4: Annual growth for population and urban land use between 2000-06 and 2006-09. Source: National Institute of Statistics and Madrid Land-Use.

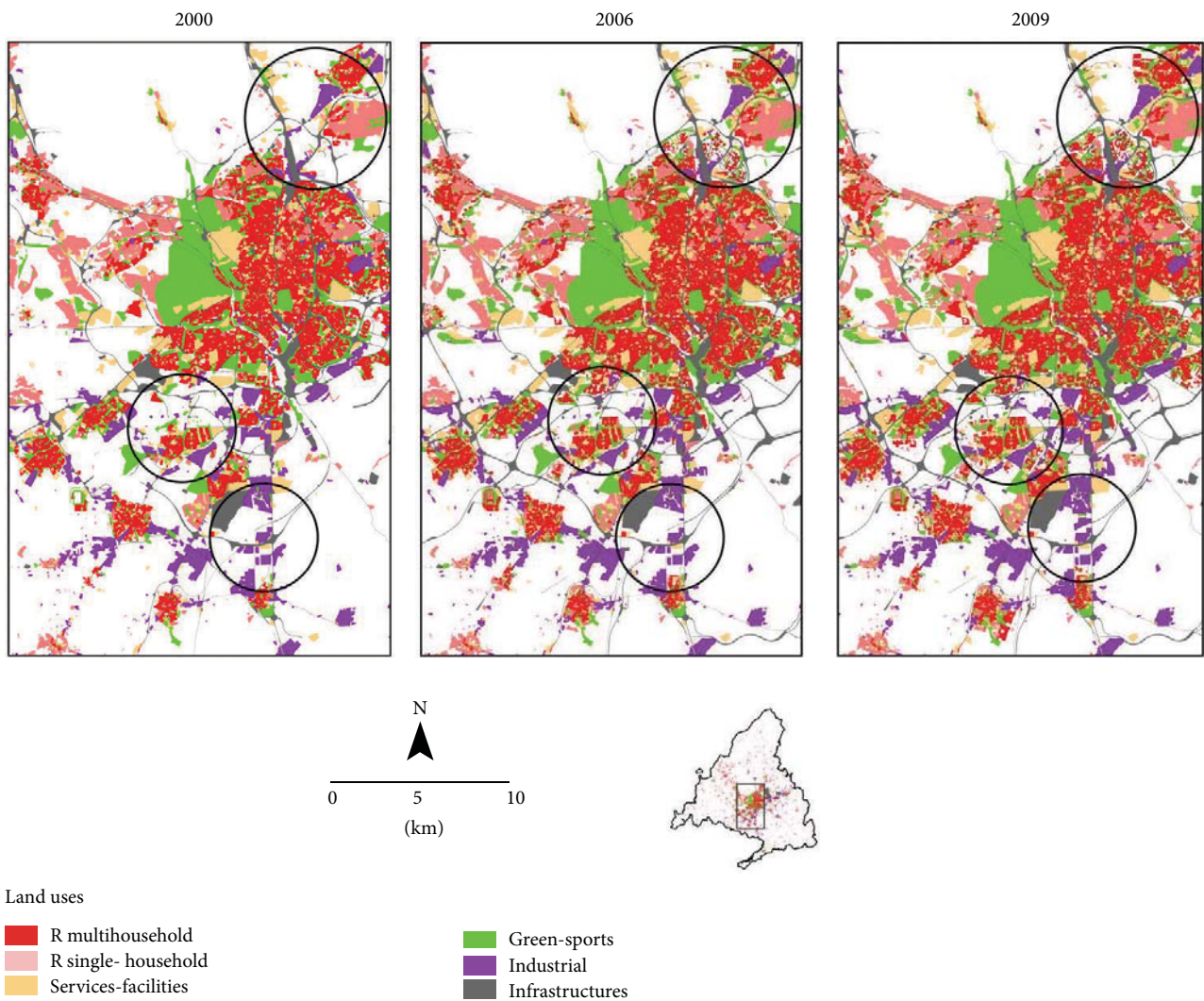


FIGURE 5: Details of the evolution of urban land according to type. 2000 (left), 2006 (centre), and 2009 (right). Source: Madrid Land-Use (MLU).

TABLE 2: Evolution of land use in the decade from 2000 (Hectares).

Land Uses	Change per year (%)					
	2000	2006	2009	2000–2006	2006–2009	2000–2009
Residential multihousehold	12,890	14,543	15,551	2.1	2.3	2.3
Residential single-household	31,286	34,444	35,673	1.7	1.2	1.6
Facilities and services	8,556	9,583	10,055	2.0	1.6	1.9
Office and retail	1,054	1,636	1,974	9.2	6.9	9.7
Green and sport areas	10,196	12,251	12,835	3.4	1.6	2.9
Industrial	10,867	12,695	13,344	2.8	1.7	2.5
Infrastructures	14,313	16,898	17,002	3.0	0.2	2.1
Total urban	89,165	102,052	106,436	2.4	1.4	2.2
Nonurban	713,387	700,500	696,116	−0.3	−0.2	−0.3
Total Madrid region	802,552	802,552	802,552			

Source: Madrid Land-Use (MLU).

of Madrid's periurban metropolitan landscape. The single-household dwellings category is the most extensive of all of the urban land uses (34% of the total in 2009, against 14% residential multihousehold dwellings), but at the same time they house a much smaller population [62]. But between 2000 and 2009, the rate of growth of single-household residential areas is much less than is the case for multihousehold dwellings. Indeed, the residential multihousehold is the only class that has increased its rate of growth in the last three years, while single-household dwellings rate has decreased (Table 2). This tendency represents a break with the preceding decade and the sprawl model. Nevertheless, many of the new multihousehold developments are also associated with low-rise buildings, with a small number of homes and open plan housing estates [49, 62].

The expansion of artificial land results also from the strong growth of other not residential activities (Table 2). The land uses that grow the most between 2000 and 2009 are those related to service activities and infrastructures, particularly in the six years of economic growth. Service activities grow 9.7% annually, green and sports areas at 2.9% annually, and infrastructures at 2.1%. However, both green and sports areas and infrastructures have seen notable reduction in the rate of growth in the last 3 years.

If we compare the expansion of the urban area with the population, significant differences can be noted (Figure 4). The rate of population growth is greater than that of the urban area and affects the spaces that are furthest away from the city centre. The highest growth rates, both in terms of population and urban area, occur in the third ring. But while the values for percentage population growth are greater in the outermost rings (fourth, fifth, and sixth), in terms of urban area, growth is greater in the second ring, and even in Madrid municipality itself (the core city), the values are not greatly different from those for the most distant rings. The growth of urban land shows a less marked expansion than the population dynamic, a situation that becomes even more pronounced for the latest years.

By land use types, the greater part of the multihousehold residential spaces is located in the city of Madrid, along with facilities and services, tertiary uses and the infrastructures themselves. On the other hand, the surface area

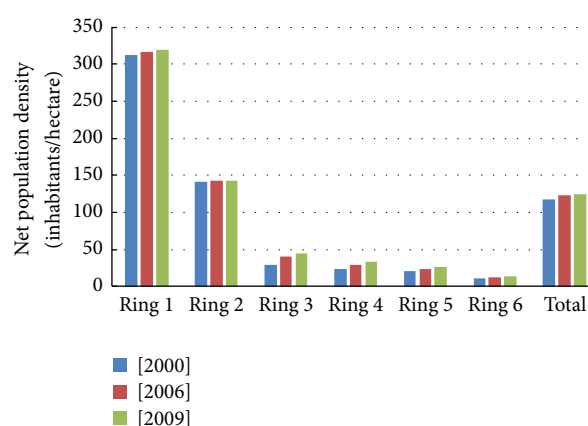


FIGURE 6: Net population density by rings (inhabitants per hectare). Source: National Institute of Statistics and Madrid Land-Use.

taken up by single-household dwellings extends strongly in the metropolitan fringe, with a much shallower fall-off towards the outside of the city. Industrial land is also strongly represented in the second and third rings (Figure 5).

5.2. An Increase in Net Population Density. The net population density in the metropolitan area of Madrid grew from 118 inhabitants/hectare in 2000 to 125 in/ha in 2009, an increase of 5.8%. The net densities are very high in the city of Madrid (320 in/ha) and in the first ring (140 in/ha), but decline strongly in the outermost rings (Figure 6). During these years a tendency towards greater densification in the outermost rings can be shown. The highest rates of population growth of the residential areas lead to a growth of net density throughout all of the metropolitan rings, but brings stronger growth in the outermost and most dynamic rings. By contrast, the net population density remains constant on the central spaces and in the first ring. Between 2006 and 2009 the growth in population density and its expansion to the outermost rings has become less intense.

The changes in the population density distribution affect the configuration of the metropolitan model of Madrid itself. Besides of the core-periphery gradient, Madrid has always shown a remarkable difference between the large

TABLE 3: Urban patches: total number and average sizes.

Year	Total	Size (Ha)	
		Mean	Standard deviation
2000	3,827	19.6	89.5
2006	4,091	20.8	95.2
2009	4,120	21.7	98.7

Source: Madrid Land-Use (MLU).

TABLE 4: Changes in number and average size of urban patches.

	2000–2006		2006–2009		2000–2009	
	Total	% annual	Total	% annual	Total	% annual
Total	264	1.15	29	0.24	293	0.85
Mean size	1.26	1.07	0.89	1.43	2.15	1.22
Standard deviation	5.66	1.05	3.55	1.24	9.21	1.14

Source: Madrid Land-Use (MLU).

metropolitan municipalities of the south and east, with densities above 250 in/ha and areas of lower density and single-household dwellings in the north and, above all, in the west of the city [62]. The evolution of the net population density shows declining density in the densely populated municipalities of the south and east. Conversely, in the north and to an even greater extent in the west, population density has notably increased, in particular in the first 6 years of greater dynamism (Figure 7). A general negative correlation can therefore be identified between net density in the year 2000 and the change in net density between the two periods (Figure 8).

5.3. The Fragmentation of Land Uses. In addition to low densities, growth dynamics associated with sprawl can be characterized by a higher discontinuity and a greater fragmentation of the urban developments. In Madrid, the number of urban land use patches had an annual increase of 0.85%. The average size and standard deviation of the patches also increased. The average size passed from 19.6 ha in 2000 to 21.7 ha in 2009, an increase of 1.2% in average size. The majority of the new urban patches appear between 2000 and 2006. On the other hand, the average size of the patches increased more strongly in the second period (Tables 3 and 4).

This tendency shows a transition from more disposed development to a return towards development of a more compact and contiguous type.

The distance between the new urban land patches and those already in existence also decreased (Table 5). The average distance between new and existing patches 2000–2009 is 410 metres. Nonetheless, the distance between existing patches and those created between 2000 and 2006 is considerably greater (almost 25%) than for those created between 2006 and 2009.

5.4. The Logic behind the Distribution of Land Use Changes. To identify the logic behind the location of the new developments in the decade 2000–2009, density maps of the new

developments were calculated (Figure 9). The maps show how the changes tend to be concentrated in particular areas, fundamentally at the intersections of high-capacity roads, reinforcing the polycentric model that had been developing in the previous decades.

In the case of the residential areas, the multihousehold dwellings tend to be concentrated in the environs of the orbital transport corridors of the first and second metropolitan rings, most strongly in the north and west of the metropolitan area (Figure 9). The intensity of these changes is greater between 2000 and 2006 than in the period of the crisis, but the location of the developments initiated in the second period reinforces these tendencies (Figure 9). The single-household residential areas are located further from the core city (Figure 9). The location of the new developments related with economic activities exhibits two very different patterns. On the one hand, the new developments associated with services tend to configure a clearly polycentric model, with locations strongly related to the high capacity road network and a very marked north-west tendency (Figure 9). Conversely, industrial activities show strong dispersion and fragmentation, with numerous locations in outermost rings and less dependent on the high capacity road network (Figure 9).

The preceding maps show how different land uses present, in some cases, similar spatial distributions. This tendency is clearer in the new developments of the north and west of the metropolitan area. The tendency shows another behaviour from the land use changes of previous decades, in the sense that while the 1980s and 1990s saw the configuration of a model with scarcely any mixture of uses, the present metropolitan subcentres tend to comprise spaces with a much greater mixture of uses (see Figure 10).

6. Discussion and Conclusions

The metropolitan area of Madrid experienced a phase of intense urban expansion at the end of the last century. The urban land surface area grew at a rate in excess of 4% per year and the spaces at the furthest remove from the core city showed the highest rates of growth [26]. Madrid should be considered as one of the leading exponents of sprawl in the Mediterranean and one of the hotspots in Europe to this respect (see report [10]). However, between 2006 and 2009, a change to this tendency can be noted. Despite demographic recovery, in particular in the innermost rings, the expansion of urban land reduced sharply. This tendency is very noticeable from 2006 onwards, a period that included the beginning of a serious economic recession in Europe and especially in Mediterranean countries. The majority of the research which is undertaken by investigating the transition from compact towards dispersed urban form (see, e.g., [3, 16, 21, 24, 63]). The concept of sprawl is derived from the description of the patterns of expansion of North American metropolitan areas over the last 50 years. From North America, the concept has been applied to analyze the urban growth in all regions of the world, to such a point that it has become another umbrella surrounded by a controversy regarding its features, causes, and effects. In general terms,

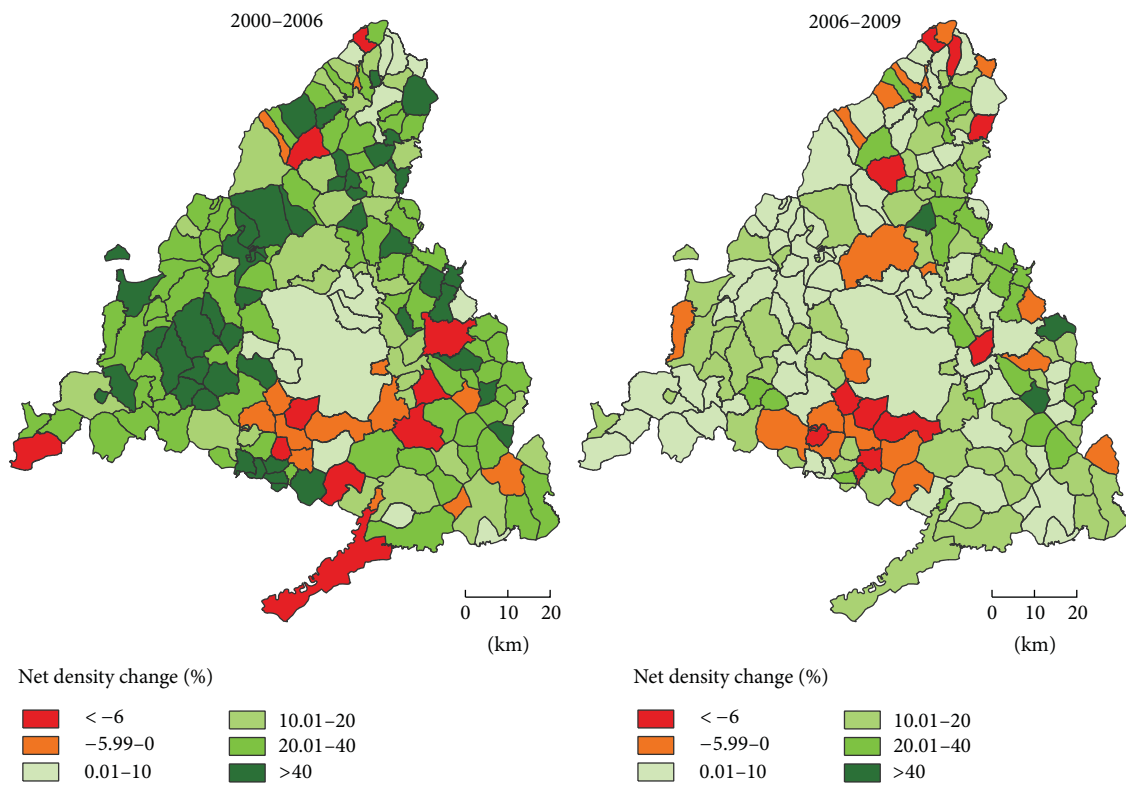


FIGURE 7: Net density change. % annual growth rate between 2000–2006 (left) and 2006–2009 (right). Source: Madrid Land-Use (MLU).

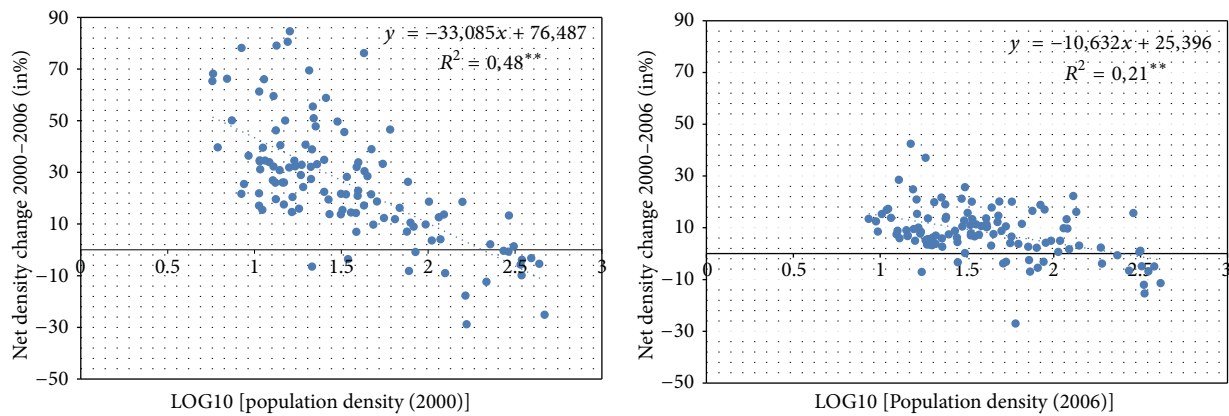


FIGURE 8: Relationship between net population density and evolution of population density by periods (municipalities). **Correlation is significant at the 0.01 level. Source: INE and MLU.

TABLE 5: Distances between new and existing urban land patches.

	Number of new patches	Annual increment	Distance from former patches Mean	Standard deviation
2000–2006	512	86	429.8	714.4
2006–2009	165	55	326.7	340.3
2000–2009	623	69	410.8	674.24

Source: Madrid Land-Use (MLU).

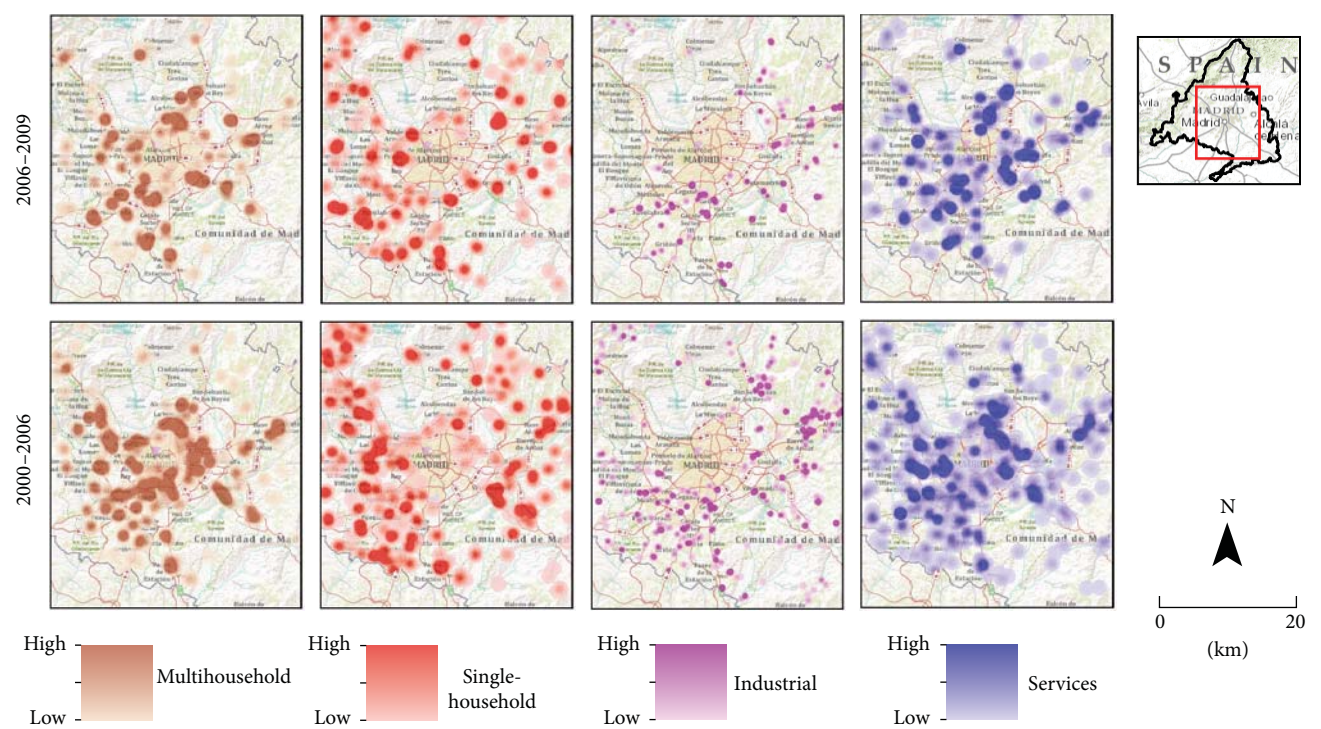


FIGURE 9: Density of in/km² in the creation of new urban land use (urban activity). Source: Madrid Land-Use (MLU).

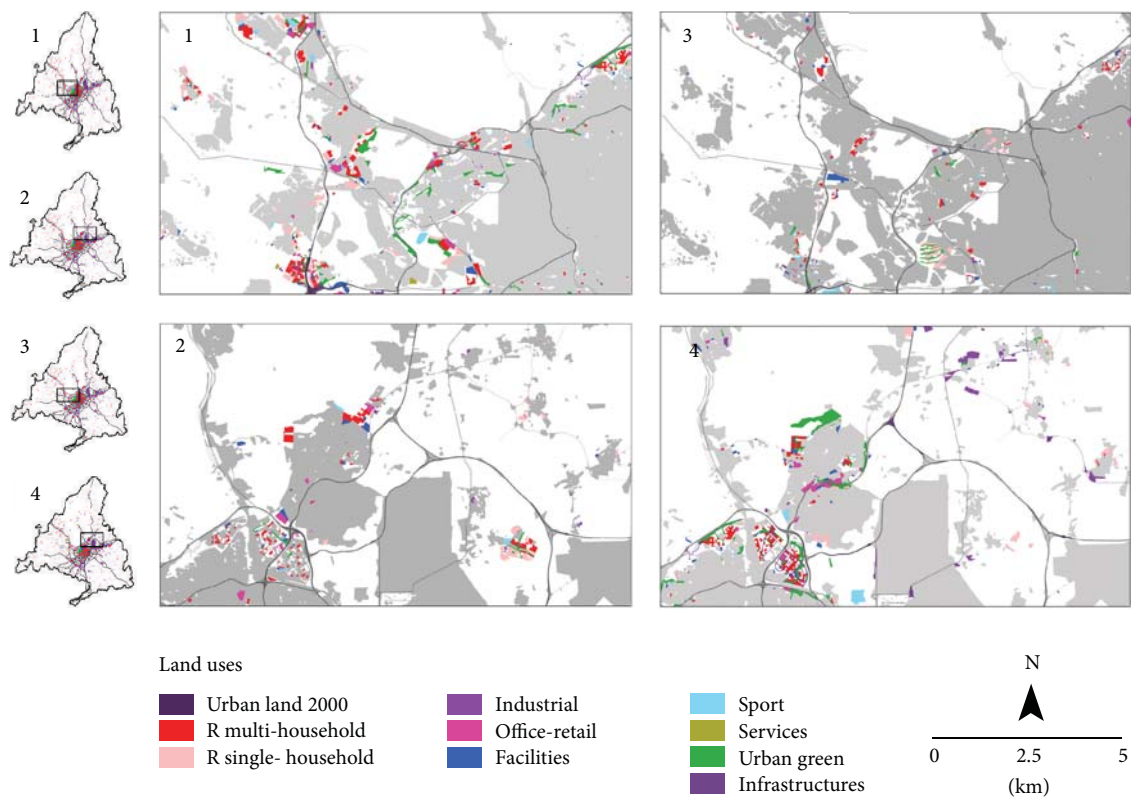


FIGURE 10: New urban land in western 2000-2006 (1) and 2006-2009 (3) and northern 2000-2006 (2) and 2006-2009 (4) in metropolitan area of Madrid. Source: MLU.

urban sprawl is a type of urban growth characterized by a low-density, dispersed spatial pattern with both environmental and social impacts [29–31, 41]. It is clear that the structure of European cities generally has become less compact, and this is also the case in Mediterranean. However, urban trends do not necessarily follow the North-American model and outcomes may differ with respect to the situation found at the other shore of the Atlantic [11, 19].

Already prior to the crisis, Madrid presented an evolution very different to the previous decades. Growth of urban land is lower, even despite the demographic recovery. This evolution breaks with the strong growth in consumption of land which characterized the evolution of Madrid in the 1990s; in fact, the urban surface area per inhabitant has reduced in the last decade. As a result, net population densities have increased. In Madrid, a “hybrid model” has become consolidated, and that means an intermediate between sprawl and the compact city, something that Catalán et al. [19] already identified in Barcelona. This hybrid model is characterized by high-rise dwellings which are of course multihousehold, but, in contrast to the characteristic dwellings of Madrid's core city or the compact metropolitan municipalities, have fewer floors and extensive open spaces and green areas. In contrast to the North-American or North European suburbs, the expansion of the residential spaces results not so much from the deployment of two or two and a half storey dwellings (single-household terraced), as from those of four to six storeys (blocks of moderate height). Although the urban landscape thus becomes more horizontally distributed and less compact and corresponds to a lower intensity in new urban developments, the numerical prevalence of the so-called *vivienda colectiva* (multihousehold dwelling) [61, 62]. These kinds of new spaces tend to homogenize the distribution of population density. In the western outskirts, a traditionally single-household area, density has increased. At the same time, in contrast, in the traditionally compact areas of the southern metropolitan area, densities have declined.

Furthermore, in this paper we have analyzed the urban expansion of Madrid by means of landscape metrics using land use cartography and GIS, an approach that is much used for analysis of changes in land use patterns and sprawl models [24, 59, 64, 65]. The results show how the expansion of Madrid between 2000 and 2009 can be differentiated from sprawl not only on the basis of the increase in densities, but also on because of the lesser fragmentation and spatial dispersion. The number of new urban land use patches reduces and the patch size grows. It is significant that while in the residential single-household spaces, existing patches increase in size, the new patches are fundamentally associated with the new multihousehold developments. Between the uses related to economic activities, only in industrial uses is the tendency to dispersion maintained, while amongst the tertiary areas, the sports and green areas a polycentric model is consolidated. In the metropolitan subcentres, there appears moreover a combination of land uses, breaking with another of the typical characteristics of sprawl. In synthesis, in the metropolitan area of Madrid, the present processes of expansion do not involve the random and chaotic dispersion of residential spaces or other periurban activities; rather, they

are linked to the improvement and densification of the transport networks. On the other hand, the dynamics of proximity are far from losing their relevance. The new subcentres in suburban contexts attract activity and population.

In this way, a polycentric growth model has intensified, again in accordance with expansion tendencies detected in other Mediterranean metropolitan areas [19, 21]. In Madrid, a model with elements of polycentrism has become established, corresponding to the consolidation of urban subcentres articulated through nodes of high accessibility, with its own dynamic and the capacity to influence the functional structure of the city [66].

The strong urban expansion of the 1990s in most Mediterranean areas was in part supported by the impotence of planning control, in many cases as a consequence of the existence of a strong administrative fragmentation (municipalities) and the lack of a common policy for the metropolitan area as a whole [21, 67], elements that are key to understanding the evolution of Madrid. However, in the last decade, as in other Mediterranean areas, a series of actions have aimed to reorient planning and introduce measures to control dispersion. Undoubtedly, these actions have been able to contain urban growth, reducing the pace of urban land expansion in the early years of the new millennium, a period of strong economic growth. The appearance of the crisis could be seen as an opportunity to turn the clock back on Madrid's recent evolution and dispense with a model of expansion that has generated serious problems of sustainability and merits correction through policies aimed to rebalance and redirect the dynamics underway [61, 68]. A detailed knowledge of land use change is fundamental for such a task.

Conflict of Interests

The authors declare that there is no conflict of interests regarding the publication of this paper.

Acknowledgments

This paper was developed by researchers from the Complutense University of Madrid with financial support from the Ministerio de Ciencia e Innovación (Project TRA2008-06682 and Project TRA2010-19788).

References

- [1] E. López, G. Bocco, M. Mendoza, and E. Duhau, “Predicting land-cover and land-use change in the urban fringe. A case in Morelia city, Mexico,” *Landscape and Urban Planning*, vol. 55, no. 4, pp. 271–285, 2001.
- [2] K. Sutton and W. Fahmi, “Cairo's urban growth and strategic master plan in the light of Egypt's 1996 population census results,” *Cities*, vol. 18, no. 3, pp. 135–149, 2001.
- [3] H. Alphan, “Land-use change and urbanization of Adana, Turkey,” *Land Degradation & Development*, vol. 14, no. 6, pp. 575–586, 2003.
- [4] J. I. Barredo, L. Demicheli, C. Laval, M. Kasanko, and N. McCormick, “Modelling future Urban scenarios in developing

- countries: an application case study in Lagos, Nigeria," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 31, no. 1, pp. 65–84, 2004.
- [5] A. G. Aguilar, "Peri-urbanization, illegal settlements and environmental impact in Mexico City," *Cities*, vol. 25, no. 3, pp. 133–145, 2008.
 - [6] G. C. S. Lin, "The growth and structural change of Chinese cities: a contextual and geographic analysis," *Cities*, vol. 19, no. 5, pp. 299–316, 2002.
 - [7] D. F. Frederic and Y. Huang, "Uneven land reform and urban sprawl in China: the case of Beijing," *Progress in Planning*, vol. 61, no. 3, pp. 211–236, 2004.
 - [8] F. Jiang, S. Liu, H. Yuan, and Q. Zhang, "Measuring urban sprawl in Beijing with geo-spatial indices," *Journal of Geographical Sciences*, vol. 17, no. 4, pp. 469–478, 2007.
 - [9] F. Dieleman and M. Wegener, "Compact city and urban sprawl," *Built Environment*, vol. 30, no. 4, pp. 308–323, 2004.
 - [10] EEA, "Urban Sprawl in Europe. The ignore challenge," Report 10/2006, Joint Research Centre, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2006.
 - [11] M. Kasanko, J. I. Barredo, C. Lavallo et al., "Are European cities becoming dispersed? A comparative analysis of 15 European urban areas," *Landscape and Urban Planning*, vol. 77, no. 1–2, pp. 111–130, 2006.
 - [12] J. Solon, "Spatial context of urbanization: Landscape pattern and changes between 1950 and 1990 in the Warsaw metropolitan area, Poland," *Landscape and Urban Planning*, vol. 93, no. 3–4, pp. 250–261, 2009.
 - [13] L. Salvati and A. Sabbi, "Exploring long-term land cover changes in an urban region of southern Europe," *International Journal of Sustainable Development and World Ecology*, vol. 18, no. 4, pp. 273–282, 2011.
 - [14] L. Poelmans and A. van Rompaey, "Detecting and modelling spatial patterns of urban sprawl in highly fragmented areas: a case study in the Flanders-Brussels region," *Landscape and Urban Planning*, vol. 93, no. 1, pp. 10–19, 2009.
 - [15] L. Salvati, M. Munafo, V. G. Morelli, and A. Sabbi, "Low-density settlements and land use changes in a Mediterranean urban region," *Landscape and Urban Planning*, vol. 105, no. 1–2, pp. 43–52, 2012.
 - [16] L. Salvati, A. Sateriano, and S. Bajocco, "To grow or to sprawl? Land cover relationships in a Mediterranean City region and implications for land use management," *Cities*, vol. 30, no. 1, pp. 113–121, 2013.
 - [17] F. Moliní and M. Salgado, "Sprawl in Spain and Madrid: a low starting point growing fast," *European Planning Studies*, vol. 20, no. 6, pp. 1075–1092, 2012.
 - [18] H. Couclelis, "Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics," *Environment and Planning A*, vol. 20, no. 1, pp. 99–109, 1988.
 - [19] B. Catalán, D. Saurí, and P. Serra, "Urban sprawl in the Mediterranean? Patterns of growth and change in the Barcelona Metropolitan Region 1993–2000," *Landscape and Urban Planning*, vol. 85, no. 3–4, pp. 174–184, 2008.
 - [20] R. Florida, *The Great Reset*, HarperCollins, New York, NY, USA, 2011.
 - [21] I. Chorianopoulos, T. Pagonis, S. Koukoulas, and S. Drymoniti, "Planning, competitiveness and sprawl in the Mediterranean city: the case of Athens," *Cities*, vol. 27, no. 4, pp. 249–259, 2010.
 - [22] R. Fernández, *El Tsunami Urbanizador Español y Mundial*, Virus Editorial, Barcelona, Spain, 2006.
 - [23] Observatorio Metropolitano de Madrid, *Paisajes Devastados Después del Ciclo Inmobiliario: Impactos Regionales y Urbanos de la Crisis*, Traficantes de Sueños, 2013.
 - [24] F. Aguilera, L. M. Valenzuela, and A. Botequilha-Leitão, "Landscape metrics in the analysis of urban land use patterns: a case study in a Spanish metropolitan area," *Landscape and Urban Planning*, vol. 99, no. 3–4, pp. 226–238, 2011.
 - [25] R. Hewitt and F. Escobar, "The territorial dynamics of fast-growing regions: unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain," *Applied Geography*, vol. 31, no. 2, pp. 650–667, 2011.
 - [26] W. Plata-Rocha, M. Gómez-Delgado, and J. Bosque-Sendra, "Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990–2000) (Land use change and urban expansion in the Comunidad de Madrid, Spain (1990–2000))," *Scripta Nova*, vol. 13, no. 293, 2009.
 - [27] W. Plata-Rocha, M. Gómez-Delgado, and J. Bosque-Sendra, "Simulating urban growth scenarios using GIS and multicriteria analysis techniques: a case study of the Madrid region, Spain," *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 38, no. 6, pp. 1012–1031, 2011.
 - [28] X. J. Yu and C. N. Ng, "Spatial and temporal dynamics of urban sprawl along two urban-rural transects: a case study of Guangzhou, China," *Landscape and Urban Planning*, vol. 79, no. 1, pp. 96–109, 2007.
 - [29] R. Ewing, "Is Los Angeles-style sprawl desirable?" *Journal of the American Planning Association*, vol. 63, no. 1, pp. 107–126, 1997.
 - [30] G. Galster, R. Hanson, M. R. Ratcliffe, H. Wolman, S. Coleman, and J. Freihage, "Wrestling sprawl to the ground: defining and measuring an elusive concept," *Housing Policy Debate*, vol. 12, no. 4, pp. 681–717, 2001.
 - [31] G. R. Hess, S. S. Daley, and B. K. Derrison, "Just what is sprawl, anyway?" *Carolina Planning*, vol. 26, no. 1, pp. 11–26, 2001.
 - [32] B. L. Turner II, W. C. Clark, R. W. Kates, J. F. Richards, J. T. Mathews, and W. B. Meyer, "The earth as transformed by human action," in *Global and Regional Changes in the Biosphere over the Past 300 Years*, B. L. Turner II, Ed., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1990.
 - [33] W. P. Anderson, P. S. Kanaroglou, and E. J. Miller, "Urban form, energy and the environment: a review of issues, evidence and policy," *Urban Studies*, vol. 33, no. 1, pp. 7–35, 1996.
 - [34] J. E. Frank, *The Cost of Alternative Development Patterns: A Review of the Literature*, Urban Land Institute, Washington, DC, USA, 1989.
 - [35] European Commission, *ESDP: European Spatial Development Perspective*, European Union, Luxembourg City, Luxembourg, 1999.
 - [36] A. Downs, "Some realities about sprawl and urban decline," *Housing Policy Debate*, vol. 10, no. 4, pp. 955–974, 1999.
 - [37] R. Ewing, R. Pendall, and D. Chen, *Measuring Sprawl and Its Impact*, Smart Growth America, Washington, DC, USA, 2002.
 - [38] O. Gillman, *The Limitless City: A Primer on the Urban Sprawl Debate*, Island Press, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 2002.
 - [39] J. E. Hasse and R. G. Lathrop, "Land resource impact indicators of urban sprawl," *Applied Geography*, vol. 23, no. 2–3, pp. 159–175, 2003.
 - [40] R. Lopez and H. P. Hynes, "Sprawl in the 1990s: measurement, distribution, and trends," *Urban Affairs Review*, vol. 38, no. 3, pp. 325–355, 2003.

- [41] R. Bruegmann, *Sprawl: A Compact History*, University of Chicago Press, Chicago, Ill, USA, 2005.
- [42] EEA, *The European Environment—State and Outlook 2010: Synthesis*, European Environment Agency, Copenhagen, Denmark, 2010.
- [43] J. Gottmann, *Megalopolis: The Urbanized Northeastern Seaboard of the United States*, MIT Press, Cambridge, Mass, USA, 1964.
- [44] J. C. García-Palomares, "Urban sprawl and travel to work: the case of the metropolitan area of Madrid," *Journal of Transport Geography*, vol. 18, no. 2, pp. 197–213, 2010.
- [45] A. Frenkel and M. Ashkenazi, "Measuring urban sprawl: how can we deal with it?" *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, no. 1, pp. 56–79, 2008.
- [46] F. Munoz, "Lock living: urban sprawl in Mediterranean cities," *Cities*, vol. 20, no. 6, pp. 381–385, 2003.
- [47] UN-Habitat, *State of the World's Cities 2012/2013: Prosperity of Cities*, Routledge, New York, NY, USA, 2013.
- [48] Ministerio of Works, *Atlas Estadístico de las Áreas Urbanas de España, 2006*, Secretaria General Técnica, Centro de Publicaciones del Ministerio de Vivienda, 2007.
- [49] R. López de Lucio, "La región urbana de Madrid: territorio y transformación en la estructura espacial," in AAVV. *La Explosión de la ciudad. Transformaciones Territoriales en las Regiones Urbanas de la Europa Meridional*, Ministerio de la Vivienda, Madrid, Spain, 2007.
- [50] J. Díaz-Pacheco and R. Hewitt, "El territorio como bien de consumo: las grandes superficies comerciales en el contexto metropolitano y su implicación para el desarrollo urbano sostenible," in *Ciudad, Territorio y Paisaje*, pp. 234–249, 2010.
- [51] P. Guerrieri, *The Rise of Unemployment in the Eurozone: The Worst of the Crisis is Not Over*, vol. 51, The G-20 and Central Banks in the New World of Unconventional Monetary Policy, 2013.
- [52] N. X. Thinh, G. Arlt, B. Heber, J. Hennersdorf, and I. Lehmann, "Evaluation of urban land-use structures with a view to sustainable development," *Environmental Impact Assessment Review*, vol. 22, no. 5, pp. 475–492, 2002.
- [53] M. Guérois and D. Pumain, "Built-up encroachment and the urban field: a comparison of forty European cities," *Environment and Planning A*, vol. 40, no. 9, pp. 2186–2203, 2008.
- [54] R. Fuller and K. Gaston, "The scaling of green space coverage in European cities," *Biology Letters*, vol. 5, pp. 352–355, 2009.
- [55] R. Catalá, J. Bosque, and W. Plata, "Análisis de posibles errores en la base de datos CORINE land cover (1990–2000) en la comunidad de Madrid. (Error analysis in the geodatabase CORINE land cover (1990–2000) in Madrid Community)," *Estudios Geográficos*, vol. 69, no. 264, pp. 81–104, 2008.
- [56] J. Feranec, G. Hazeu, S. Christensen, and G. Jaffrain, "Corine land cover change detection in Europe (case studies of the Netherlands and Slovakia)," *Land Use Policy*, vol. 24, no. 1, pp. 234–247, 2007.
- [57] J. Díaz-Pacheco and J. C. García-Palomares, "A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation," *Journal of Maps*, vol. 10, no. 3, pp. 424–433, 2014.
- [58] J. Díaz-Pacheco and J. Gutiérrez, "Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas," *Journal of Land Use Science*, vol. 9, no. 3, pp. 243–259, 2013.
- [59] A. Botequilha Leitão and J. Ahern, "Applying landscape ecological concepts and metrics in sustainable landscape planning," *Landscape and Urban Planning*, vol. 59, no. 2, pp. 65–93, 2002.
- [60] A. Botequilha-Leitão, J. Miller, J. Ahern, and K. McGarigal, *Measuring Landscapes. A Planner's Handbook*, Island Press, Washington, DC, USA, 2006.
- [61] R. L. de Lucio, "Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid (Urban morphology and characteristics of the new peripheries. Nine residential landscapes in the urban region of Madrid)," *Urban*, vol. 9, pp. 56–80, 2004.
- [62] J. Gutiérrez and J. C. García-Palomares, "New spatial patterns of mobility within the metropolitan area of Madrid: towards more complex and dispersed flow networks," *Journal of Transport Geography*, vol. 15, no. 1, pp. 18–30, 2007.
- [63] F. Terzi and F. Bolen, "Urban sprawl measurement of Istanbul," *European Planning Studies*, vol. 17, no. 10, pp. 1559–1570, 2009.
- [64] K. C. Seto and M. Fragkias, "Quantifying spatiotemporal patterns of urban land-use change in four cities of China with time series landscape metrics," *Landscape Ecology*, vol. 20, no. 7, pp. 871–888, 2005.
- [65] J. N. DiBari, "Evaluation of five landscape-level metrics for measuring the effects of urbanization on landscape structure: the case of Tucson, Arizona, USA," *Landscape and Urban Planning*, vol. 79, no. 3–4, pp. 308–313, 2007.
- [66] M. T. Gallo, R. Garrido, and M. Vivar, "Cambios territoriales en la Comunidad de Madrid: policentrismo y dispersión," *EURE*, vol. 36, no. 107, pp. 49–65, 2010.
- [67] R. Hewitt and V. Hernandez-Jimenez, "Devolved regions, fragmented landscapes: the struggle for sustainability in Madrid," *Sustainability*, vol. 2, no. 5, pp. 1252–1281, 2010.
- [68] A. Leboeiro, "De la teoría a la práctica en la planificación territorial," *Urban*, vol. 3, pp. 68–80, 1999.

II.1.4.- The effect of the neighbourhood, the data conversion, and resampling strategies on land use change dynamical models: an experimental approach

The effect of the neighbourhood, the data conversion, and resampling strategies on land use change dynamical models: an experimental approach

Jaime Díaz-Pacheco¹; Hedwig van Delden²; Richard Hewitt³

1. Departamento de Geografía Humana. Universidad Complutense de Madrid.

C/ Profesor Aranguren, s/n, 28040, Madrid

jdiazpac@ucm.es

2. Research Institute for Knowledge Systems.

P.O. Box 463 - 6200 AL Maastricht - The Netherlands

hvdelden@riks.nl

3. Universidad de Alcalá de Henares

Pza. San Diego, s/n - 28801 - Alcalá de Henares

Introduction

Researchers in land use/land cover (LULC) change modelling tend to approach their research with different objectives for different regions, so they work at different cartographic spatial scales. All spatial phenomena need a proper scale to be observed and modelled ([Woodcock & Strahler, 1987](#)). Nonetheless the same phenomenon could be modelled at various scales depending on the spatial context analysed. Urban land growth, for example, can be considered as a phenomenon which must be modelled at high detailed scale, because the urban land use units can be small in size (facilities, parks, residential areas, etc.). However, if we were modelling the urban growth of Europe, the scale of analysis should not be too detailed or we could miss the generality of the process and the possibility to portray the urban process at a suitable scale for a continent. Geographical scale of models depends then on the phenomenon to be modelled and the spatial context (micro, local, regional, global...) of the phenomenon that is going to be analysed. Certainly, from a geographical point of view variability of scale can be regarded both as a strength and weakness of the discipline ([Lam & Quattrochi, 1992](#)), therefore LULC change models, as geographical tools, are clearly subject to the same consideration. The results of dynamic spatial models are strongly influenced by the scale, so a particular set of research outcomes might only be relevant at one specific scale, making the results not applicable at other spatial scales. Nonetheless the possibility of changing the approach by changing the scale of analysis

could also be considered an advantage since it could allow data and information to be adapted the context where the analyzed process are occurring (i.e. operational scale). Additionally, different scales can be used to process different levels of information within the same approach to reflect, for example, differing human perceptions of space ([Vliet, White, & Dragicevic, 2009](#)).

In dynamic land use models based on CA, despite the recognized importance of scale by the researchers (Jenerette & Wu, 2001; Theobald & Hobbs, 1998; Ménard & Marceau, 2005), there are few scientific contributions about the effects of the spatial scale in this kind of models. In this paper, we draw on previous research and make new contributions about some of the most usual methods for rasterizing and resampling land use data. Moreover, we explore the effects of the scale on urban land use models based on cellular automata mainly linked with the neighbourhood influence used in that kind of applications.

Research Background

Despite many attempts to find a method to define the best scale to carry out an observation ([Tobler, 1988](#); [Lam & Quattrochi, 1992](#)), the final decision is often taken on the basis of the researcher's own specialist knowledge. Such a decision may not always follow a rigorous procedure, but is not usually arbitrary, and is often constrained by data availability. Ideally, the appropriate scale for observations should be appropriate to the characteristics of the operator and end-user, the type of environment and the kind of information desired ([Woodcock & Strahler, 1987](#); [Lam & Quattrochi, 1992](#)).

The use of one or other scale of detail whatever our approach is a key question to which some forethought should be given, as likewise, is the amount of information and the level of disaggregation of the data that we should employ (depending on the chosen scale of work) to achieve an specific modelling outcome. In fact, the issue of scale has been studied in some depth, particularly from the perspective of classification of remotely-sensed images ([Woodcock & Strahler, 1987](#)). In this field, remote sensing science has traditionally focussed on finding the suitable resolution/cell-size of an image to collect the proper data in order to supply the best information to deal with a

specific phenomenon. It means that if we collapse an image successively to coarser resolutions the local variance could change depending on the nature of the environment and the sizes and spatial relationships of the objects which it contains (forested, agricultural, urban environments...). Another well-known problem relating to spatial scale and resolution is the relationship between the cartographic scale and resolution. The difficulty lies in finding the adequate grain-size to convert vector mapped information. Finally, one last notable theme with respect to spatial scale is the MAUP (modifiable areal unit problem), described initially by Openshaw ([1983](#)). On one hand, Openshaw was concerned with the arbitrary way in which the spatial units for performing particular spatial analyses in a region are often selected. The key issue here is that the information initially contained in a specific spatial unit (e.g. counties, municipalities, households, cells...), could, when aggregated to other greater units (at a smaller scale), produce totally different results, quite independently of the kind of spatial analysis carried out. On the other hand, and directly related to what had earlier been known as *the scale problem*, MAUP also produces *the zoning problem* ([Jelinski & Wu, 1996](#)). The zoning problem occurs when a set of areal units are combined into a new configuration of spatial units, e.g. when irregular polygons are converted to a regular grid or when a grid of regular units is aggregated to a grid with a larger cell size.

In models of LULC change, the core of the geodatabase employed is a set of land use maps (two or more) which represent different categories or LULC classes. This qualitative information is usually saved in vector or raster format to be used in a GIS or other software which supports geographic information. When the researcher makes use of this information the research aims or modelling software employed may often impose a specific operational scale and format, so it is very common to transform the original data according to these requirements. When categorical land use information is converted from vector format to a specific cell size raster-grid or is successively resampled to a lower resolution from a raster-grid format, the previously mentioned MAUP zoning problem ought to be taken into account. In one case that might be frequently encountered, a set of spatial units of irregular shape are converted to a regular grid format (vector to raster); in another case a set of regularly-shaped spatial units are resampled to other spatial units of a lower resolution. One of the two aims of

this work is to test some of the most commonly used methods for transforming the static land use information from vector to raster and for aggregation by resampling from a larger cell size to a smaller one.

In these kinds of models scale is relevant to three model components; 1) the extent, 2) the neighbourhood and 3) the cell size (resolution). Ménard et al ([2005](#)) observed how changing the size of two of these three elements (neighbourhood radius and resolution) produced a non-linear relationship between the spatial scale and the simulation results. Their work was based on a dataset derived from remote sensing images for two time periods and focused on land cover change. The study area was dominated by forest and agriculture, so the phenomenon of urban expansion was not considered ([Ménard & Marceau, 2005](#)). Samat ([2006](#)) also addressed on this topic but his work was more strongly oriented toward the effects of spatial scale in an CA urban modelling system. This study aimed to aid the process of selection of the appropriate scale for a CA-based urban model. The work also addressed the way in which the generation of a realistic simulated urban landscape related to the scale properties of the model, showing how the model was scale independent under a specific range of scales ([Samat, 2006](#)). This work has some limitations. On the one hand, the analysis comprised only two land use classes (urban and non-urban), and the urban land use was not critical to select the scales for the tests. Moreover, the land use dataset employed was drawn from different sources for both time periods (1990 and 1998). In addition, the cartographic scale chosen for the smallest cell resolution tested (30x30m.) does not seem to respect, at least for 1990, the general rules for transformation of a scaled vector map (1:75,000) to a raster grid map, ([Tobler, 1988](#)).

This work contributes to the analysis of the effect of the scaling factor on a dynamic urban land use change model based on cellular automata, taking advantage of a high detailed land use geodatabase (1:10.000) focussed in urban land uses over 3 time periods (2000, 2006 and 2009), where identical criteria were used for the built each of the land use dataset periods. In addition, the model comprises 12 land use classes of which 7 are urban and 6 are actively simulated. This permits the observation of the effects of the change of scale on the model (cell size and neighbourhood) for different urban land uses with dissimilar spatial behaviour and dissimilar clustering. The aim of

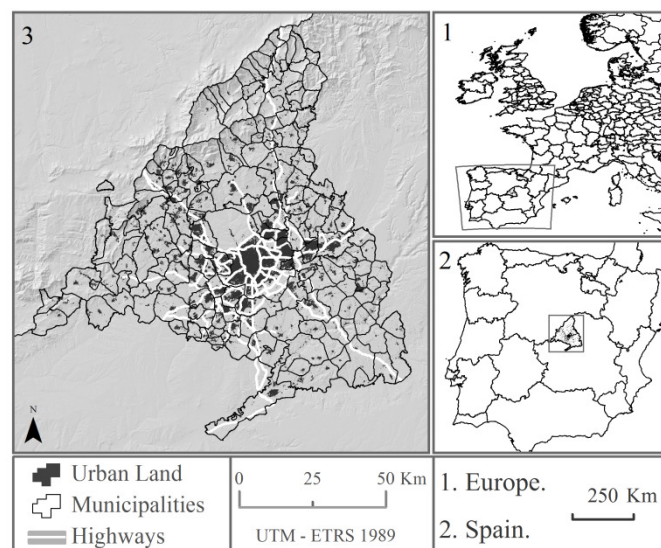
this work is to analyse the relationship between the scale and cell-resolution and its effect on the drivers and outcomes of the model. This allows a greater degree of understanding of the degree of dependence between the model and the scale to be obtained.

THE STUDY AREA AND LAND USE DATASET

Study area

The area selected for the analysis is the Madrid region. This region was chosen both not only because of the availability of a highly detailed land use database (Díaz-Pacheco and García Palomares 2014), but above all, for the great dynamism that this region experienced during the period of change chosen to model. The Madrid region has around 6 million inhabitants and has experienced an extraordinarily dynamic change during recent decades, until the beginning of the current economic crisis around 2008.

Figure 1. Location of Madrid region



Source: Díaz-Pacheco and Gutiérrez, (2013)

The expansion of urban land use in the Madrid metropolitan area during the 1990's was spectacular, at least by European standards. According to CORINE land cover (EEA, 2014), urban land increased by more than 30,000 ha, an annual growth rate of 4.77%, when at this time, the population grew scarcely 0.8% a year. Furthermore, in these years

the surface area under construction grew by 200% ([Plata Rocha, Gómez Delgado, & Bosque Sendra, 2009](#); [Hewitt & Escobar, 2011](#)). This growth of urban land, in a situation of demographic stability, supposed a notable increase in the available built-up area per person, which was transformed in only 5 years (1996-2001) from 153 m² to 179 m² per inhabitant ([de Lucio, 2011](#)).

Land use data set

Madrid Land Use (MLU) is a cartographic database of land use and land cover information for the Madrid Region, covering the time periods 2000, 2006 and 2009. Though primarily focussed on urban land it also includes non-urban classes. Mapping was undertaken at a highly detailed scale, with the basic reference scale for mapping established as 1:10,000, and the minimum mapping unit being 1 Ha. The technical process did not include automatic or computer-assisted classification tasks, and the mapping work was undertaken entirely by photo-interpretation of high resolution (0.5 m) aerial orthophotographs, supported by large scale cartographic and cadastral information (1:5,000 and 1:1,000, respectively). MLU clearly represents an excellent cartographic dataset for urban land use in Madrid and outperforms CORINE land cover (the only other widely available LUCC database that covers at least 2 time periods) in this area in a number of respects (see [Diaz-Pacheco & Gutiérrez, 2013](#)).

AIMS

1. The first aim of this work was to find the most accurate and least error prone way of rasterizing and resampling large detail scale land use data.

Cartographic data resolution is continually increasing, thanks to the ever more powerful data collection technology (10 years ago it would not have been possible to map Madrid land use from orthophotos at a scale of 1:10000). However, many intensive processing operations, such as land use modelling, cannot usefully operate at such large scales and so need to be downsampled to lower resolutions to allow greater processing efficiency. For this reason, the issues explored in this paper are likely to become increasingly relevant in future years. The research presented here is thought to be of interest

especially to land use modellers, who frequently both rasterize and resample their data before modelling, and yet who often pay little attention to the details of the process.

2. The second aim of this work, by extension from the first aim, is to explore the effects of scale more generally on a land use model's capacity to simulate land use change.

METHODS

To achieve the objectives defined for this research, a number of common methods of land use data conversion from vector to raster and aggregation by resampling from a high cell resolution to a lower one were tested. This itself, though it was initially carried out in order to find the most suitable cell aggregation method.

Firstly we describe the data conversion and cell aggregation methods to obtain the most appropriate data for use in the applications at different resolution. Secondly we present the methodology employed to measure the effect of the change of the scale on the CA land use model and lastly, the map comparison methods used in both analyses are described.

Vector-raster conversion and resample.

As previously mentioned, many methods have attempted to determine the adequate scale and resolution particular observed geographic phenomenon. However, despite the large amount of research in this field, it is common practice in cellular-automata based land use models to make the final decision about the use of a specific on the basis of data availability, the aim of the research, the computer processing time and researchers' experience see some examples in ([Clarke, 1997](#); [Robert White & Engelen, 1997](#); [White & Engelen, 2000](#); [Silva & Clarke, 2005](#); [Barredo, Demicheli, Lavallo, Kasanko, & McCormick, 2004](#); [Sun, 2003](#)). Though it is clearly important to take into account all of these factors, sometimes the decision is taken in a rather arbitrary way without considering possible alternatives. There is a widespread and persistent belief that larger

scale, higher resolution⁸ datasets are automatically better, even if the level of detail required for the modelling activity is far less than the nominal scale provides. For example, in an urban land simulation carried out at the scale of the city, it is not usually necessary to be able to separate athletic tracks from sports fields or urban gardens from their associated dwellings.

Once a specific land use geodatabase is obtained, it is also common practice to carry out some kind of data transformation in order to adjust the data and the resolution according to the requirements and aims of the model that is to be developed. One of the most commonly used land use data conversion operations is from vector format to raster format. It is also frequently necessary to resample from one raster resolution to another one, generally of coarser resolution. Both raster-vector conversion and raster resampling have been the subject of much previous research, particularly in the early days of Geographical Information Systems (GIS) ([van der Knaap, 1992](#)).

This is important because the relationship between raster resolution and thematic classification accuracy has been shown to be linear in that, the size of the misclassified area on raster maps is directly related to the resolution of the raster map ([Carver & Brunsdon, 1994](#)). At the same time, vector to raster, conversion of land use data, like other types of categorical data, may produce a number of non-independent position and

8 For clarity, since there is so much confusion surrounding the issue, it is necessary to explain clearly the terms used in this article. “Scale” is used to refer to the nominal scale at which survey has been carried out, dependent on the survey instrumentation and the level of detail desired *at the time the survey was undertaken*. Using the map at a different scale to the nominal scale is not recommended. Here we adopt the convention used by land surveyors and a more detailed map is said to have a *larger scale* than a less detailed map. For resolution, we adopt the terms used by landscape ecologists, and subsequently, geographical information science. A map comprising many pixels is described as having a small, grain size or high resolution, a map of the same area having few pixels is described as having a large grain size or low resolution. Though large scale maps often have a high resolution (more pixels being needed to depict greater detail), the two terms are not interchangeable since it is perfectly possible to rasterize a large scale vector map at a low resolution. This could be said to affect the level of detail depicted, but not the *scale*. One of the key conclusions of this research is that it is important to consider carefully both the scale of the mapping used and the resolution at which it will be used in any model, since, as we show here, this has major ramifications for simulation *accuracy*.

attribute errors ([Veregin, 1989](#)). Positional accuracy refers to the proximity of a mapped element to its real spatial location, and attribute accuracy is used to define the level of precision with which each mapped element is characterized, e.g. in the case of an urban land area that is mapped as industrial, but which is, in reality a residential area, the attribute accuracy of the map would be lower than if this area had been correctly designated residential land.

In modern GIS software, these conversion operations are implemented through a range of different techniques and algorithms, about which much discussion is given in existing literature. This paper does not intend to repeat this work but instead focuses on providing rigorous testing of the outcomes of some of the most commonly used methods for vector-raster conversion and resampling. Side-by-side comparisons are also made of various resampling methods. Direct conversion from vector to raster at a variety of different grid resolutions.

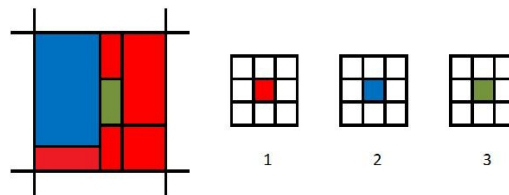
Vector to raster conversions were performed from the original MLU land use vector dataset to a grid of 25x25m., 50x50m., and 100x100m. resolution successively. These conversions were carried out from the 25x25m. resolution raster using the centre cell algorithm (the suitability of the cell centre algorithm will be explained forward). 100x100m. was considered the minimum required resolution to manage land use change model focused on urban land use patterns in which 7 categories of urban land are distinguished⁹. The most detailed resolution (25x25m.) was selected following recommendations given by Switzer (1975) in which 50 per cent of the area of the cell must be less than the smallest mapped polygon. In the MLU geodatabase the smallest mapped polygon is 302,4 m² and the 50 per cent of a 25x25 m. cell is 312,5 m², which complies with the requirements of this rule.

9 This decision was made on the basis of the authors' knowledge of the mapped region and may be different elsewhere – in Madrid, for example, a 100m cell side length is an adequate match for most urban parcels from high density residential blocks to low density “garden suburbs”. Industrial units and urban parks and gardens tend to be larger but are rarely smaller. This approximate match is lost at 200m x200m resolution.

Vector to raster conversion

Some loss of accuracy in the vector polygon to raster format conversion is unavoidable, due to classification errors where the irregular polygon boundary coincides with a regular grid ([Carver & Brunsdon, 1994](#)). Nonetheless, the degree of error is highly dependent on the conversion technique used ([van der Knaap, 1992](#)). Three techniques implemented in the software ArcGIS 10.0 for direct conversion from a vector polygon coverage to a regular grid were analysed. ArcGIS 10.0 was chosen because this software is very widely used and because the detailed explanation of the procedures used is given in the user manual, which is not always a feature of all GIS software. The techniques employed were Cell Centre, Maximum Area and Maximum combined area (according to the software denomination). The first used to be called *central point* and the latter two *area unit rasterization*. A clear example is shown in Figure 2.

Figure 2. Vector polygon to raster. 1) Mca. Maximum Combined Area; 2) Ma. Maximum Area; 3) Cc. Cell centre.



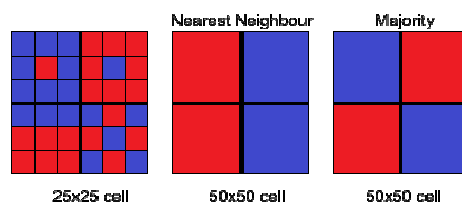
Source: Adapted from ArcGIS 10.0 help manual

Using the cell centre (Cc) algorithm the final categorical value of every cell of the grid is the attribute value which coincides with the centre of the cell. In the case of the maximum area algorithm (Ma) the final value of the cell is established by assigning the value of the largest polygon coincident with the cell. The maximum combined area algorithm (Mca) works in a similar way to the former except that the value of the cell is taken from the total area of different polygons with the same attributes coincident with the cell.

Resample.

As previously mentioned, thematic classification accuracy declines following a linear scale as raster map resolution is reduced. Nonetheless, the different resample methods provide dissimilar outputs. If we have a large scale categorical land use map of vector polygons and we want to work with a smaller scale raster grid, one possible option would be direct conversion from vector to raster as explained above. Another frequently used approach is to convert the vector map to an intermediate raster of higher resolution appropriate to the original vector mapped scale, with the required lower resolution maps being produced by subsequent resampling. In the same way as for the vector to raster conversion test, two techniques implemented in the software ArcGIS 10.0 have been applied consecutively, in this case to aggregate by resample a grid of 25x25m. (previously obtained from a vector polygon land use map) into a grid of 50x50 m. and 100x100 m. cell size. The techniques employed were *nearest neighbourhood assignment* (Near) and *majority* (Maj). The former assigns the categorical value to the new cell according to the value of the cell closest to the centre of the new cell and the latter assigns the most popular values of the cells in the input map which fall inside of the new cell in the output map. A simple example of both algorithms is showed in Figure 3.

Figure 3. Different techniques for resampling. Nearest Neighbour (Near) and Majority (Maj).



Source: Adapted from ArcGIS 10.0 help manual

For the nearest neighbourhood assignment method it is indicated that the maximum spatial error will be one-half of the cell size, while for the majority method the results of the resample tends to be smoothed (<http://webhelp.esri.com>).

Effects of the scale in a land use change dynamic model based on cellular automata.

The scale in land use change dynamic models based on cellular automata comprises three elements, grid resolution, the neighbourhood size and type and the extent ([Ménard & Marceau, 2005](#)). Of these, the extent is often chosen arbitrarily since the pattern modelled has the same behaviour independently of the size of the region under consideration (the extent). However, even where the extent is fixed variation in the cell-size and the neighbourhood radius can affect the patterns generated. ([Ménard & Marceau, 2005](#); [Samat, 2006](#)). In order to evaluate these effects a set of different applications were developed, in which the neighbourhood and the cell-size were varied while the extent remained constant. .

The model selected to explore these affects was that implemented inside the off-the-shelf software “Metronamica”. This model was first developed by Roger White and Guy Engelen (1993) and is very well-known and widely used around the world for simulating urban land transformation. (Barredo, 2004; van Delden, 2005; Lajoie, 2007).

In this model, the distribution of land use in a given area is represented as a raster map in which each cell has a value which represents a land use. The value of the cells can change according to a set of transition rules computed by a simple equation in which the geographic effect of a cell over its neighbours (attraction or repulsion between land use cells) represents the main driving force of change in the system,. A random parameter to incorporate a degree of stochasticity into the model is also introduced. Accessibility (e.g. distance to road networks) and suitability (e.g. degree of terrain slope) parameters are introduced to align the model with the characteristics of the study region. Finally a zoning parameter can be also added to allow the influence of policies or planning scenarios to be introduced into the simulation..

Not all land uses are modelled in the same way, individual land use classes must be assigned to one of three land use states. They may be either *function*, (dynamic, changing as a result of external demands), generally assigned to land uses which occupy other land areas (e.g. urban land), *vacant* (dynamic, does not change due to an external demand, but does change as a result of changes to the function land uses), generally

natural vegetation classes and some agricultural types, or *feature*. Feature land use classes (e.g. large bodies of water) remain inert throughout the model runtime and neither occupy other land areas nor are occupied themselves.

The transition potential is specified as:

$$P_j = N_j A_j S_j \alpha_z Z_j$$

Where:

P_j : Is the transition potential

A_j : The accessibility from cell j to any element of the transport network

N_j : Is the neighbourhood calculated by a function of a weighted sum to express the influence of the state of a cell j over a specific group of cells into a specific range of distance

S_j : Is the suitability of the cell j for changing to a specific state

α_z : Is a random parameter which introduces stochastic perturbations on cell j

Z_j : Is the zoning status (land policies, planning, restrictions...) for the cell j

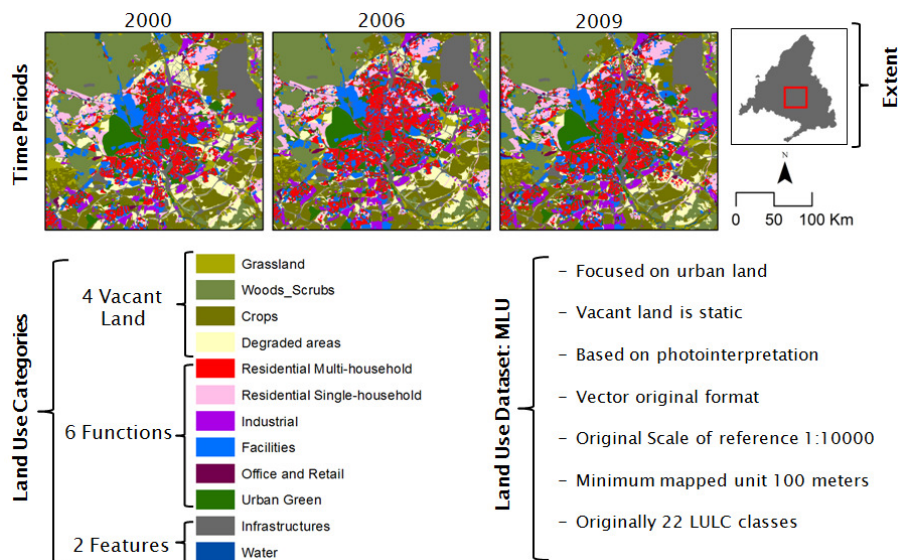
The application designed for the Madrid region used in this research does not incorporate zoning parameters in order to give a high degree of freedom to the system. The only suitability factor included is the slope of the terrain, since this was found to be the only physical suitability factor of importance to urban land change in this region. . Thus land use transformations are influenced mainly by Neighbourhood, and Accessibility, and occasional stochastic perturbations from the Random factor.

Accessibility is empirically calibrated for each simulated land use through a distance decay function. In the case of the Madrid application, the distance to different elements of the transport network, like the highways, roads, train stations and metro stations was introduced.

The random component is defined by the expression $1 + (-\log(1 - R))^\alpha$ where R is a random matrix of values and the exponent α is a coefficient that allows the random perturbation to be scaled. Low scale factors tend to produce highly deterministic simulations while high scale factors tend to produce a high number of random transitions. For the Madrid application the value of α was empirically fixed at 0.5.

To apply Metronamica to an existing study area, transition rules are determined by trial and error, a process known as *calibration* in which repeated simulations of a historical date are made and compared with the map for that date until acceptable goodness of fit (according to well-defined parameters) is achieved. In general terms, a high similarity between these maps (t_f data and t_f simulated) presumes an improvement in the calibration of the application. It is usual to test transition rules obtained by this means by running the model to a further historical date not used in calibration. This process is known as *validation*. In the Madrid application land use was represented as 12 land use classes of which 6 were functions, 4 were vacant and 2 were features (See Figure 4). In this application all the active land uses are urban or other artificial land classes.

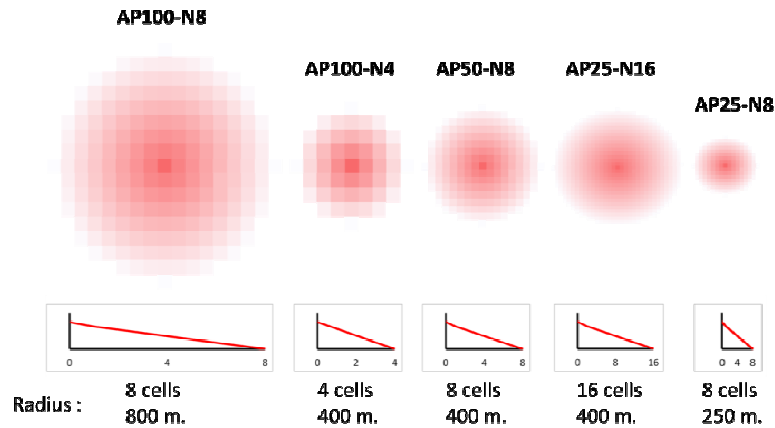
Figure 4. Characteristics of the Madrid Model



Initially a 50x50 m. cell application was developed , calibrated and validated over three time periods (2000, 2006 and 2009) with a neighbourhood radius of 8 cells (400 m.). Once this application had been validated, two new applications were developed, one in

which the cell size was doubled (100 m.) and another in which the cell size was halved (25 m.). Then, in order to make the neighbourhood influence equivalent to the initial 50 m. cell application two more applications were developed, one with 100m. cell size, in which the neighbourhood radius was halved (4 cells) and other with 25 m. cellsize in which the neighbourhood radius was doubled (16 cells) (see figure 5).

Figure 5. Example of neighbourhood influence adapted for each application



The neighbourhood influence values at successive distances were kept constant in all applications.

The accessibility values were kept constant in all applications. The random factor r was also kept constant for all the applications.

Map comparison methods used for calibration and sensitivity analysis

Both the results from the different conversion and resampling methods and the results from the change of CA model scale were analysed using a set of map comparison techniques. These techniques were also employed to guide the calibration process of the land use cellular model.

The map comparison methods and techniques used during the calibration and validation processes (see above) are currently implemented in the software Map Comparison Kit (MCK), initially created by the Netherland Environment Assessment

Agency ([Visser & De Nijs, 2006](#)). Three statistical tests were used to determine model accuracy, Kappa simulation (K_{sim}), clumpiness, and mass fractal dimension. The first of these, K_{sim} , is useful for determining the number of cells that have been correctly simulated, while the remaining two measures are used for determining the degree of spatial similarity between elements in the simulated map and the real map (White, 2006). The extent (in cells) occupied by every land use in the maps is also measured. In addition, a previous qualitative visual assessment based on the researcher criteria is generally included in the examination ([Pontius Jr & Millones, 2011](#)).

The Kappa coefficient of agreement (Cohen, 1960) is a widely used index to calculate the rate of agreement between two images or two maps since they are categorical datasets.

Kappa simulation (K_{sim}) is a modification of the traditional Kappa coefficient which is useful to evaluate simulations over short time periods. Most of land use models usually simulate changes over years or decades during which time many locations do not experience any land use change. Unfortunately, under standard Kappa, locations which do not change are also included in the calculation which means that very high Kappa scores can be obtained regardless of the degree of accuracy of the simulation. Standard Kappa is therefore not a useful measure of goodness of fit for simulations produced by land use models. Kappa simulation takes values from -1, meaning total disagreement, to 1, indicating total agreement. The value 0 represent a special situation *where the agreement is as good as can be expected by chance given a random distribution of the given class transitions* (see [van Vliet, Bregt, & Hagen-Zanker, 2011](#)).

Calibration and validation of the 50m resolution model

Calibration was considered to be complete once values of 0.144 had been obtained for K_{sim} . The values considerably outperform a null model (The model was considered acceptably validated at 0.113 (Table 1). These values are comparable with published values considered acceptable in many other applications of the model (e.g. Hewitt et al 2014)

Table 1. Values of the used indexes for calibration and validation of the 50 m. application.

Index	AP50-00-06	AP50-06-09	RAMD50
Kappa simulation	0.144	0.113	-
R. Multi-household Clumpiness Difference	-0.0226	-0.0023	-0.0811
R. Single-household Clumpiness Difference	-0.0018	0.0071	-0.0754
Industrial Clumpiness Difference	0.0235	0.0029	-0.1196
Facilities Clumpiness Difference	-0.0183	-0.0093	-0.0856
Office and Retail Clumpiness Difference	0.0112	0.0081	-0.2593
Urban Green Clumpiness Difference	-0.0361	-0.0081	-0.1115
Fractal Dimension Difference	0.0070	0.0013	-0.0268
	CALIBRATION Data06-Sim06	VALIDATION Data09-Sim09	BENCHMARK

Both clumpiness and mass fractal dimension are often employed in landscape ecology to analyse landscape structure. In this research, these metrics allow the spatial similarity of the simulated map and reference map to be assessed. Clumpiness is a measure of the degree of dispersion/aggregation of the patches in an image according to their type (McGarigal, 1994). Mass fractal dimension measures the degree of “linearity” of elements in the map in which plane filling objects like circles or squares will have a value of 2.0 and a line will have a value of 1.0 (Gardner, Milne, Turnei, & O'Neill, 1987).

For both clumpiness and mass fractal dimension, the calibrated and validated application achieve similar values and both outperform a random land use map used as benchmark. Analogous circumstances happen with the clumpiness index, tested for each one of the simulated land uses. The simulation produced by the application get better similitude values than the random taken as benchmark (see table 2).

Once the simulation produced by the 50 m. application was considered suitable to reproduce the land use patterns of change, some of its scale characteristics were modified in order to evaluate their effects over the model.

Replication and testing of the calibrated 50m cell-resolution application

The calibrated and validated 50m cell-resolution application was replicated, modifying the resolution of the cells (25 m. and 100m.) by direct conversion from the original vector map using the cell centre method, but maintaining the cell radius for the

neighbourhood effect at 8 cells. Finally, two additional applications at 25m and 100m cell-resolution applications were created with respectively larger (16 cells) and smaller (4 cells) radii so as to maintain the equivalent cell neighbourhood distance as in the original 50m application. All the applications were run using the same parameter settings employed in the original 50m application.

RESULTS AND DISCUSSION

Results of resample/conversion comparison

To examine the results of the resample/conversion operations, five land use classes selected from the land use map for 2000 were analysed. These classes were chosen in order to give the greatest possible diversity of patch size for the experiment. The crops category has a very large mean patch size (107.70 ha) compared to the facilities category (3.07 ha). Residential multi-household (10.89 ha), industrial (7.56 ha.) and urban green (5.57 ha.) were selected to provide patch sizes intermediate between the two extremes.

Table 2. Comparison of results from the conversion/resample operations

Land Use Class Mean Patch Size	Index		Direct conversion to 50 m. Central Cell		Direct conversion to 50 m. Maximum Area		Direct conversion to 50 m. Maximum Combined Area		Resample to 50 m. Nearest Neighbourhood		Resample to 50 m. Majority
Crops 107.70	Clumpiness difference		0.0060		0.0089		0.0092		0.0060		0.0165
	Fractal dimension difference		0.0090		0.0212		0.0193		0.0236		0.0271
	Area difference ha		36.7394		4.2394		4.2394		19.2394		870.0106
	Kappa index		0.9535		0.9555		0.9556		0.9463		0.9500
R. Multihousehold 10.89	Clumpiness difference		0.0117		0.0179		0.0193		0.0113		0.0345
	Fractal dimension difference		0.0004		0.0118		0.0137		0.0022		0.0485
	Area difference ha		20.7797		176.0297		177.2797		7.5297		325.7797
	Kappa index		0.9136		0.9168		0.9177		0.9003		0.9082
Industrial 7.56	Clumpiness difference		0.0063		0.0102		0.0100		0.0064		0.0179
	Fractal dimension difference		0.0038		0.0107		0.0103		0.0005		0.0271
	Area difference ha		5.5083		108.5083		108.5083		5.2417		447.9917
	Kappa index		0.9217		0.9236		0.9077		0.9088		0.9146
Urban Green 5.57	Clumpiness difference		0.0121		0.0158		0.0170		0.0128		0.0307
	Fractal dimension difference		0.0266		0.0375		0.0427		0.0247		0.0642
	Area difference ha		17.3125		9.1875		9.1875		3.8125		212.0625
	Kappa index		0.9048		0.9074		0.9077		0.8907		0.8986
Facilities 3.07	Clumpiness difference		0.0120		0.0168		0.0177		0.0122		0.0313
	Fractal dimension difference		0.0116		0.0178		0.0203		0.0120		0.0341
	Area difference ha		4.3011		69.9489		69.9489		6.6989		494.6989
	Kappa index		0.8930		0.8961		0.8966		0.8773		0.8852

Source: MLU

The land use vector map was directly converted to a 25 m resolution raster map using the cell centre method. The 25 m resolution map was aggregated to a 50 m. resolution

map 1 by two different resampling methods (nearest neighbourhood and majority). In addition, the land use vector map was also directly converted to a 50 m resolution raster map using three methods (cell centre, maximum area, and maximum combined area). All the resultant 50 m resolution maps were then disaggregated to 25 m resolution. Finally the selected land use classes were compared. Two spatial indices, clumpiness and fractal dimension were employed, and the absolute difference in hectares was also computed. The kappa simulation index was also applied as another map indicator of map similarity. The results of the conversion/resample operations are shown in table 2.

Results

Looking at Table 2 (above) it can be rapidly appreciated that the cell centre method gives the best results for direct conversion and the nearest neighbourhood method gives the best results for resampling. However, for the Crops category, the *maximum area* and *maximum combined area* direct conversion methods give acceptable results, at least on the basis of the fractal dimension index, and area difference in hectares.. The reason seems to be related with the larger clusters found in this category (the mean patch size is 101.70 ha.).

For the resampling operations, it can be seen that the majority method produces the lowest degree of similarity with the original data. Since this method is widely used by researchers, this is a key finding.

Results of the comparison between applications of different resolution

The comparison results between the data for 2006 and simulations for the same year are showed in table 3.

According to the map comparison indices used, the simulation results from all of the different applications (apps) for 2006 (2000-2006) could be considered acceptable Both the 25m. app with the 8 cell neighbourhood radius and the 100 m. app with the 4 cell neighbourhood radius actually improve on the original 50 m 8 cell neighbourhood radius app (table 3). If we look at the values for clumpiness, the difference between the clumpiness of the data and clumpiness of the simulations is comparable across all the

applications, and better than the random simulation used as a benchmark. The same is true of the fractal dimension index. In some cases the scale-modified apps achieve slightly better values than the initial app of 50m (e.g. AP100-N4 clumpiness for multi-household and facilities classes). However, better performance of some categories tends to be compensated by poorer performance for others. Taken overall, the differences between the scale-modified apps and the original app are not great enough to be able to claim that any of the modified applications are significantly worse or better than the original 50m app.

Table 3. Map comparison results for applications. Abbreviations: AP50-25-100: applications and resolutions; N8-4: neighbourhood and radius in cells; RAMD50-100-25: random simulations and resolutions.

Index	Applications					Benchmarks		
	AP50-N8	AP25-N8	AP100-N8	AP25-N16	AP100-N4	RAMD50	RAMD100	RAMD25
Kappa simulation	0.144	0.149	0.116	0.146	0.158	-	-	-
R. Multi-household Clumpiness Difference	0.0226	0.0430	0.0050	0.0400	0.0007	0.0811	0.0602	0.1017
R. Single-household Clumpiness Difference	0.0018	0.0079	0.0111	0.0192	0.0250	0.0754	0.0643	0.0867
Industrial Clumpiness Difference	0.0235	0.0020	0.0409	0.0111	0.0409	0.1196	0.0991	0.1352
Facilities Clumpiness Difference	0.0183	0.0290	0.0065	0.0567	0.0044	0.0856	0.0609	0.1054
Office and Retail Clumpiness Difference	0.0112	0.0156	0.0731	0.0284	0.0835	0.2593	0.1981	0.3007
Urban Green Clumpiness Difference	0.0361	0.0642	0.0108	0.0849	0.0099	0.1115	0.0752	0.1550
Fractal Dimension Difference	0.0070	0.0108	0.0053	0.0157	0.0003	0.0268	0.0182	0.0299

Making a visual comparison between the land use data maps for 2006 and the simulations produced by the different applications, there are obvious differences that can be quickly detected even though it is not really possible to specify the precise degree of similarity between the maps by this method. Figure 6 shows simulated (right hand) and real (left hand) land use for an enlargement of a highly urbanized (mainly residential) area in 2006. It is clear that the visual appearance of the maps reinforces the results of the statistical comparisons, i.e. none of the scale-modified apps looks significantly better or worse than any other for the land use changes simulated for the year 2006, despite the modifications made on the scale. The middle column of Figure 6 shows the apps with different resolutions (25m., 50m. and 100 m.) and the same neighbourhood radius in cells (N8). In these cases, despite the difference in resolution,

all three simulations are quite alike, something that can be confirmed by consulting the results of the statistical indices (Table 3).

This is a rather surprising result. Since the scale modifications have been applied only to the maps themselves, not to the neighbourhood rules, neighbourhood influence is *different* in all three applications. The maximum cell neighbourhood of 8 cells corresponds to a distance of 350m (7x50) away from the central cell in the original 50m app, 175m away from the central cell in the 25m app, and 700m away from the central cell in the 100m app. Two possible explanations could be advanced for this; 1) the cell neighbourhood is not the key change driver (contrary to most known studies of urban change) or; 2) the neighbourhood influence declines very steeply and that all important interactions take place at near distances. Further experimental work would be needed to confirm or deny these hypotheses.

CONCLUSIONS

The work presented in this paper has examined the influence of vector to raster conversion and resampling of large detail scale land use data on map accuracy, and the effects of scale changes more generally on a land use model's capacity to simulate land use change. Some important conclusions can be drawn that are likely to be extremely useful for researchers working with cell-based land use models.

It is clear from this work that the use of one particular method over another can produce quite different results, both for vector to raster conversion operations and for raster resampling from one resolution to another.

For urban patch types (smaller mean patch sizes), better results (a closer match to the original land use dataset) are obtained by converting directly from the original vector coverage to a raster of the desired resolution than by converting to a scale equivalent to the original vector coverage and subsequently resampling up or down to give the desired resolution. Amongst the resampling methods themselves, the nearest neighbour technique gives improved performance respect to the original land use dataset than the majority procedure.

Figure 6. Comparison of data 2006 and simulations for 2006, different apps. Abbreviations:
 SIM: simulation; APP25-50-100: application and resolution; N4-8: neighbourhood and radius.



Regarding the effects of changing the scale of a dynamic CA land use model, as reflected by the cell resolution and neighbourhood radius, no significant variation was obtained in the accuracy of the final simulations, at least in the urban context considered and for the range of resolutions tested (25 m., 50m. and 100m.). A calibrated and validated land use model based on a 50m resolution raster gave very similar results to applications with identical transition parameter settings but mapped at higher (25m) and lower (100m) resolutions. The goodness-of-fit evaluation techniques employed (cell statistics, pattern comparison, visual inspection) showed that all of the applications acceptably reproduced the relevant land use change patterns with comparable degree of success.

The most surprising result is certainly the discovery that doubling or halving the neighbourhood distance radius did not produce any significant variation in the land use simulations. This indicates that the transition rules are highly insensitive to neighbourhood distance effects, either because other model parameters are more important in driving urban land use change in this area, or because neighbourhood effects are all occurring at close distances.

Further work on these kinds of models could investigate the effect of changing the random parameter included in the equation for potential transition computation. In this work the random coefficient was kept constant for all the tested applications.

REFERENCES

Barredo, J. I., Demicheli, L., Lavalle, C., Kasanko, M., & McCormick, N. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B*, 31(1), 65-84.

Carver, S., & Brunsdon, C. (1994). Vector to raster conversion error and feature complexity: an empirical study using simulated data. *International Journal of Geographical Information Systems*, 8(3), 261-270.

Clarke, K. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 24, 247-261.

de Lucio, R. L. (2011). Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid. *Urban*(8), 124-161.

- Diaz-Pacheco, J. & Gutiérrez, Javier (2013). Exploring the Limitations of CORINE Land Cover for Monitoring Urban Land use Dynamics in Metropolitan Areas. *Journal of Land Use Science* (just-accepted).
- Engelen, G., White, R., & Uljee, I. (1997). Integrating constrained cellular automata models, GIS and decision support tools for urban planning and policy making. *Decision support systems in urban planning*, 125-155.
- Engelen, G., White, R., Uljee, I., & Wargnies, S. (1996). Numerical modeling of small island socio-economics to achieve sustainable development. *Coastal and Estuarine Studies*, 51, 437-463.
- Gardner, R. H., Milne, B. T., Turnei, M. G., & O'Neill, R. V. (1987). Neutral models for the analysis of broad-scale landscape pattern. *Landscape ecology*, 1(1), 19-28.
- Hewitt, R., & Escobar, F. (2011). The territorial dynamics of fast-growing regions: Unsustainable land use change and future policy challenges in Madrid, Spain. *Applied Geography*, 31(2), 650-667.
- Hewitt, R., Van Delden, H., & Escobar, F. (2014). Participatory land use modelling, pathways to an integrated approach. *Environmental Modelling & Software*, 52, 149-165.
- Jelinski, D. E., & Wu, J. (1996). The modifiable areal unit problem and implications for landscape ecology. *Landscape ecology*, 11(3), 129-140.
- Jenerette, G. D., & Wu, J. (2001). Analysis and simulation of land-use change in the central Arizona–Phoenix region, USA. *Landscape ecology*, 16(7), 611-626.
- Lam, N. S. N., & Quattrochi, D. A. (1992). On the Issues of Scale, Resolution, and Fractal Analysis in the Mapping Sciences*. *The Professional Geographer*, 44(1), 88-98.
- McGarigal, K. M., B. (1994). Spatial pattern analysis program for quantifying landscape structure. Reference manual. Corvallis Oregon. 62 Forest Science Department, Oregon State University.
- Ménard, A., & Marceau, D. J. (2005). Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 32(5), 693-714.
- Openshaw, S. (1983). *The modifiable areal unit problem* (Vol. 38): Geo books Norwich.
- Plata Rocha, W., Gómez Delgado, M., & Bosque Sendra, J. (2009). Cambios de usos del suelo y expansión urbana en la Comunidad de Madrid (1990-2000). *Scripta Nova: revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 13.
- Pontius Jr, R. G., & Millones, M. (2011). Death to Kappa: birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407-4429.

- Samat, N. (2006). Characterizing the scale sensitivity of the cellular automata simulated urban growth: A case study of the Seberang Perai Region, Penang State, Malaysia. *Computers, environment and urban systems*, 30(6), 905-920.
- Silva, E. A., & Clarke, K. C. (2005). Complexity, emergence and cellular urban models: lessons learned from applying SLEUTH to two Portuguese metropolitan areas. *European Planning Studies*, 13(1), 93-115.
- Sun, Z. (2003). *Simulating Urban Growth Using Cellular Automata*. M Sc Thesis, ITC Netherlands.
- Switzer, P. (1975). *Estimation of the accuracy of qualitative maps*: John Wiley, London.
- Theobald, D. M., & Hobbs, N. T. (1998). Forecasting rural land-use change: a comparison of regression-and spatial transition-based models. *Geographical and Environmental Modelling*, 2, 65-82.
- Tobler, W. (1988). Resolution, resampling, and all that. *Building databases for global science*, 12, 9-137.
- van der Knaap, W. G. (1992). The vector to raster conversion:(mis) use in geographical information systems. *International Journal of Geographical Information Systems*, 6(2), 159-170.
- van Vliet, J., Bregt, A. K., & Hagen-Zanker, A. (2011). Revisiting Kappa to account for change in the accuracy assessment of land-use change models. *Ecological Modelling*, 222(8), 1367-1375.
- Veregin, H. (1989). *A taxonomy of error in spatial databases*: NCGIA Santa Barbara, CA, USA.
- Visser, H., & De Nijs, T. (2006). The map comparison kit. *Environmental Modelling & Software*, 21(3), 346-358.
- Vliet, J. v., White, R., & Dragicevic, S. (2009). Modeling urban growth using a variable grid cellular automaton. *Computers, environment and urban systems*, 33(1), 35-43.
- White, R. (2006). Pattern based map comparisons. *Journal of Geographical Systems*, 8(2), 145-164.
- White, R., & Engelen, G. (1997). Cellular automata as the basis of integrated dynamic regional modelling. *Environment and Planning B*, 24, 235-246.
- White, R., & Engelen, G. (2000). High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, environment and urban systems*, 24(5), 383-400.

White, R., Engelen, G., & Uljee, I. (1997). The use of constrained cellular automata for high-resolution modelling of urban land-use dynamics. *Environment and Planning B*, 24, 323-344.

Woodcock, C. E., & Strahler, A. H. (1987). The factor of scale in remote sensing. *Remote sensing of Environment*, 21(3), 311-332.

II.1.5.-Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software



Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica
International Review of Geographical Information Science and Technology

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

MODELADO DEL CAMBIO DE USOS DE SUELO URBANO A TRAVÉS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES. COMPARACIÓN CON DOS APLICACIONES DE SOFTWARE

JAIME DÍAZ-PACHECO¹ y RICHARD HEWITT²

¹Universidad Complutense de Madrid; ²Universidad de Alcalá

¹Calle Profesor Aranguren, s/n - 28040 - Madrid; ²Pza. San Diego, s/n - 28801 - Alcalá de Henares

¹jdiazpac@ghis.ucm.es; ²richard.hewitt@uah.es

RESUMEN

Este trabajo aborda el uso de métodos basados en redes neuronales artificiales (RNA) para la modelización del cambio de usos de suelo en la región de Madrid. Se exploraron los potenciales de transición de cambio de usos de suelo urbano en Madrid y al mismo tiempo fueron comparados los resultados producidos por dos aplicaciones diferentes que implementan un prototipo de cálculo basado en redes neuronales artificiales RNA: Land Transformation Modeler de la Universidad de Purdue (LTM) y Land Change Modeler (LCM), éste último implementado en el software IDRISI Taiga de la Universidad de Clark. Las bases de datos geográficas recogen dos periodos temporales de estado de usos de suelo urbano (2000 y 2006) para entrenar y calibrar el modelo y un tercer periodo temporal (2009) para llevar a cabo un proceso de validación. Los resultados han mostrado que ambas aplicaciones, a pesar de contener el mismo algoritmo pueden llegar a producir resultados disímiles. Además este trabajo confirma la utilidad de los modelos de simulación de cambio de usos de suelo basados en RNA para la definición de patrones de comportamiento y la generación de mapas de aptitud de usos de suelo.

Palabras clave: redes neuronales artificiales, cambio de usos de suelo, simulación urbana, Madrid.

MODELLING URBAN LAND-USE CHANGE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. COMPARING TWO SOFTWARE APPLICATIONS

ABSTRACT

This paper discusses the use of a methodology based on artificial neural networks (ANNs) for modeling land use change in the region of Madrid. The aim of this paper is to explore the potential for urban land use change transition in Madrid and also to compare the results produced by two different applications that implement ANNs: Land Transformation Modeler (LTM), developed by

Recibido: 30/09/2013

Aceptada versión definitiva: 20/01/2014

© Los autores
www.geo-focus.org

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

MODELADO DEL CAMBIO DE USOS DE SUELO URBANO A TRAVÉS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES. COMPARACIÓN CON DOS APLICACIONES DE SOFTWARE

JAIME DÍAZ-PACHECO¹ y RICHARD HEWITT²

¹Universidad Complutense de Madrid; ²Universidad de Alcalá

¹Calle Profesor Aranguren, s/n - 28040 - Madrid; ²Pza. San Diego, s/n - 28801 - Alcalá de Henares

¹jdiazpac@ghis.ucm.es ; ²richard.hewitt@uah.es

RESUMEN

Este trabajo aborda el uso de métodos basados en redes neuronales artificiales (RNA) para la modelización del cambio de usos de suelo en la región de Madrid. Se exploraron los potenciales de transición de cambio de usos de suelo urbano en Madrid y al mismo tiempo fueron comparados los resultados producidos por dos aplicaciones diferentes que implementan un prototipo de cálculo basado en redes neuronales artificiales RNA: Land Transformation Modeler de la Universidad de Purdue (LTM) y Land Change Modeler (LCM), éste último implementado en el software IDRISI Taiga de la Universidad de Clark. Las bases de datos geográficas recogen dos periodos temporales de estado de usos de suelo urbano (2000 y 2006) para entrenar y calibrar el modelo y un tercer periodo temporal (2009) para llevar a cabo un proceso de validación. Los resultados han mostrado que ambas aplicaciones, a pesar de contener el mismo algoritmo pueden llegar a producir resultados disímiles. Además este trabajo confirma la utilidad de los modelos de simulación de cambio de usos de suelo basados en RNA para la definición de patrones de comportamiento y la generación de mapas de aptitud de usos de suelo.

Palabras clave: redes neuronales artificiales, cambio de usos de suelo, simulación urbana, Madrid.

MODELLING URBAN LAND-USE CHANGE USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS. COMPARING TWO SOFTWARE APPLICATIONS

ABSTRACT

This paper discusses the use of a methodology based on artificial neural networks (ANNs) for modeling land use change in the region of Madrid. The aim of this paper is to explore the potential for urban land use change transition in Madrid and also to compare the results produced by two different applications that implement ANNs: Land Transformation Modeler (LTM), developed by

Recibido: 30/09/2013

Aceptada versión definitiva: 20/01/2014

© Los autores

www.geo-focus.org

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Purdue University and the Land Change Modeler (LCM) software implemented in IDRISI Taiga (Clark University). The geodatabase used covered urban land uses for two time periods (2000 and 2006), employed to train and calibrate the model, and a third time period (2009), used to conduct a validation process. The results showed that even though both applications implement the same algorithm, they can produce different results. In addition, this work underlines the usefulness of ANN-based land use change simulation models to reproduce patterns of land change to generate land use suitability maps.

Keywords: artificial neural network, land use change, urban simulation, Madrid.

1. Introducción

Los investigadores se preguntan cómo acercarse a la comprensión del funcionamiento de un fenómeno evolutivo espacio-temporal de carácter geográfico y social tan dinámico y complejo como lo son las grandes áreas urbanas. ¿Puede la dinámica de usos de suelo acercarnos a la comprensión del funcionamiento del fenómeno urbano? Para contestar a esta cuestión afirmativamente, es preciso aceptar inicialmente que existen unos patrones de cambio en los usos de suelo que se producen como respuesta a unos factores internos o externos al área de estudio y pueden ser cuantificados en base a su efecto sobre dichos patrones de cambio. Dicho esto, la siguiente cuestión sería, tal y como se plantean (Barredo *et al.*, 2003): ¿Cómo contribuirían estos factores a la dinámica de los usos de suelo en las ciudades?

Aceptada la existencia de unos patrones más o menos complejos que rigen la dinámica de usos de suelo de las grandes áreas urbanas y en disposición de explorar aquellos factores que influyen en estos patrones surge la búsqueda de modelos geográficos. Dichos modelos tratan de incorporar ambas cuestiones para explicar, por un lado, el funcionamiento del fenómeno urbano desde el punto de vista de la dinámica de usos de suelo, y por otro, proveer posibles escenarios futuros de comportamientos del espacio urbano en función de la alteración de los mencionados factores.

El uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y de métodos implementados en estos, y el desarrollo de modelos de cambio de usos de suelo, en este caso basados en redes neuronales artificiales (RNA), permiten analizar los cambios de usos de suelo que se han producido en un área determinada en el espacio y en el tiempo. Estos modelos pretenden inquirir las "reglas" que rigen la dinámica de cambio de los usos de suelo, así como los factores que intervienen en ésta. De esta manera, los modelos ayudan a explicar los procesos que han tenido lugar y también simular posibles situaciones prospectivas. Además, este tipo de modelos comienzan a tener gran interés de aplicación dentro de regiones mediterráneas y más concretamente en territorio español, como en este caso concreto, dónde el gran dinamismo de cambio de usos de suelo producido por la actividad humana está demandando este tipo de herramientas de simulación para el apoyo a la planificación y a la ordenación del territorio (véanse ejemplos de ello en Aguilera Benavente, 2008; Benavente, Montes and Bosque, 2010; Aguilera Benavente *et al.*, 2011; Clavero *et al.*, 2010; Hewitt, Hernández-

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Jiménez and Escobar, 2012; Hewitt *et al.*, 2012; Gómez Delgado y Rodríguez Espinosa, 2012, 185-272).

La modelización de los cambios de usos del suelo comienza por la observación de los cambios de estado en la ocupación del suelo en una determinada región, representados a través de un mapa de usos de suelo (generalmente en formato raster). A partir de esta aproximación inicial comienza un ejercicio deductivo para descubrir los lugares susceptibles de manifestar algún tipo cambio en los usos y la ocupación de suelo. Generalmente, los modelos se basan en que la disposición en el espacio de cada unidad del territorio representada (cada celda de una tesela raster), determinará su potencial para acoger a una determinada clase de uso de suelo. Este potencial se define por una serie de normas de transición, cuyo reflejo final es un mapa que indica los valores potenciales de cada célula para mutar a una categoría específica de usos de suelo.

Las normas de transición generan, por tanto, la capacidad y la aptitud que puede tener una unidad de espacio (o una celda en el mapa raster) para ser ocupado por un uso u otro. Generalmente se considera que la aptitud comprende todas las características de un área de terreno que influyen sobre su uso o ocupación, bien biofísicas (altitud, temperatura, precipitación, etc.) o bien socio-económicas (distancia a carreteras, densidad de población, índice de paro, etc.). Las interpretaciones del concepto de aptitud dependen de la dinámica de cambio que se pretende modelizar, por ejemplo, deforestación (Schneider and Gil Pontius, 2001), potencialidad para agricultura en regadío (Yu, Chen and Wu, 2009), modelización de cambios históricos en la vegetación o cambios urbanos (Pijanowski *et al.*, 2005). Las diferencias entre varios modelos suelen depender en la manera en que determinan una localización u otra para ser ocupada por nuevos usos. Algunos modelos ofrecen ventajas sobre otros en función del problema de investigación.

Este trabajo es un ejemplo de estas iniciativas que tratan de simular los cambios de usos de suelo a través de modelos basados en RNA implementados en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Para ello, se han utilizado dos aplicaciones diferentes que implementan un prototipo de cálculo basado en redes neuronales artificiales RNA: Land Transformation Modeler de la Universidad de Purdue (LTM) y Land Change Modeler (LCM), éste último implementado en el software IDRISI Taiga de la Universidad de Clark. Ambas incorporan el algoritmo perceptrón multicapa, para el cálculo de las transiciones potenciales de cambios de uso de suelo, pero las simulaciones producidas por ambas presentan algunas diferencias.

En este caso, el área de estudio seleccionada ha sido la región de Madrid, un espacio bastante estructurado por la evolución de un sistema urbano-metropolitano de gran dinamismo. Esta particularidad y la disponibilidad de una base de datos sólida de usos de suelo urbano para los periodos 2000, 2006 y 2009 convierten a esta región en un laboratorio urbano cuyo comportamiento puede ser extrapolado a otras regiones urbanas mediterráneas. Además, por el hecho de que el área geográfica tratada, mantiene un alto dinamismo durante los periodos analizados, con incrementos en la urbanización y ocupación de suelo que se mantienen constante, con ligeras variaciones, durante los referidos periodos.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

El objetivo de la investigación fue planteado en dos direcciones. Por un lado se compararon los resultados que producen las mencionadas aplicaciones (LCM y LTM), que utilizan RNA para el cálculo de los potenciales de transición de cambio de usos de suelo, en este caso urbano. Por otro lado también se trataron de explorar estos potenciales o patrones de cambio de usos de suelo urbano que han tenido lugar entre los periodos analizados (2000-2006). Para validar el poder predictivo de ambas aplicaciones se ha utilizado un tercer periodo de datos reales (2009), comparando posteriormente los resultados ofrecidos por las mencionadas aplicaciones. Los procesos llevados a cabo han seguido gran parte del enfoque descrito por Pijanowski (2002a, 2005, 2002b).

La comparación de los resultados obtenidos por ambas aplicaciones tiene una importancia creciente dentro del campo de la modelización de usos de suelo, debido a que casi todos los modelos reclaman una generalidad que, a menudo, difícilmente se puede realmente demostrar. En el caso de los modelos basados en RNA -aunque creamos que es un problema común de todos los modelos geográficos- el proceso de entrenamiento llevado a cabo por la red neuronal artificial puede producir complicaciones de sobreajuste (*overfitting*), cuando el modelo llega a producir una simulación de alto grado de "acierto" sobre la comparación con los datos reales mediante las variables seleccionadas. Esto puede conllevar la pérdida de fiabilidad al aplicarse a otros estudios de caso, o incluso a zonas de estudio adyacentes representadas por los mismos datos. Únicamente a través de una comparación objetiva de dos (o más) modelos se puede llegar a una evaluación fiable de la utilidad de cada modelo aplicado al área de estudio en cuestión, puesto que, con los resultados de un sólo modelo es casi imposible averiguar los parámetros de error. Una valoración puramente estadística (índice de kappa, porcentaje correcto, etc.) puede resultar más o menos útil frente al hecho de desconocer el nivel de exactitud o ajuste que realmente se puede conseguir con los mismos datos o área de estudio aplicando otras técnicas disponibles.

Conforme aumentan cada vez más la oferta de herramientas informáticas para la modelización, al mismo tiempo aumenta la incertidumbre sobre la utilidad de cada una con respecto a las otras. No obstante, es también cierto que este hecho permite la posibilidad de compararlas. Este último paso puede ser algo parecido a la revolución de las estadísticas de los años 90, cuando empezó a sustituirse poco a poco, el método de aplicar un único modelo estadístico que se adecuaba perfectamente a la cuestión considerada (estadísticas univariantes), por la práctica de usar una amplia gama de métodos estadísticos todos con varias ventajas y desventajas (estadísticas multivariantes). De la misma forma en que la repentina disponibilidad de ordenadores y software cada vez más potentes permitió una revolución en la estadística durante los años 90, podemos preguntarnos si el próximo futuro de la modelización de cambios de usos de suelo quizás debería centrarse en un proceso de síntesis y amalgamación de las herramientas más adecuadas, en vez del camino *univariante* en que se aplica un sólo modelo a una cuestión específica y de manera independiente.

Esta comunicación está organizada de la siguiente forma: después de esta introducción, en la sección 1 se exponen de manera breve el origen de la utilización general de las RNA y su aplicación a la búsqueda de patrones de cambio de usos de suelo. En la sección 2 se realiza una descripción del área de estudio, destacando aspectos relacionados con este trabajo, para posteriormente explicar la metodología y detallar las principales fuentes utilizadas en la sección 3.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Por último en la sección 4 se presentan los resultados obtenidos y se realizan unas breves conclusiones.

2. Antecedentes

Las RNA fueron concebidas para generar una forma de inteligencia artificial que trata de replicar el funcionamiento del cerebro de un mamífero, en cuanto a su comportamiento para administrar el sistema de conexiones neuronales que determinan la ejecución o la inhibición de un proceso. Actualmente, las RNA han encontrado aplicación en un amplio rango de disciplinas, resultando apropiadas para la resolución de problemas de reconocimiento de patrones a través de cálculos computacionales (Noriega, 2005). En las RNA las células que procesan la información en el cerebro, denominadas neuronas, son modeladas como nodos interconectados en una serie de capas organizadas de manera jerárquica. Estos nodos se activan a causa de un interruptor binario que se conoce como función de activación. Si el nodo se activa transmite información a la cadena de procesos. Cada nodo es capaz de recibir información desde múltiples nodos procedentes de capas anteriores.

Almeida *et al.* (2008) señalan que las RNA pueden ser definidas de manera simple como un instrumento de cálculo masivo y paralelamente distribuido organizado en unidades de procesamiento, también denominados neuronas o nodos, las cuales se organizan en un conjunto de capas. Una de las primeras redes neuronales artificiales desarrolladas fue la creada por Rosenblatt en 1958 la cual denominó perceptrón (perceptron). El perceptrón consiste en la existencia de un nodo único, el cual recibe entradas que son ponderadas aleatoriamente dando lugar a resultados de acuerdo a unas reglas (umbrales) definidas. Este ingenio neuronal simple es capaz de clasificar linealmente y de manera separada, datos, a la vez que desarrolla funciones lineales.

El perceptrón multicapa (MLP) de red neuronal artificial (RNA) descrito por Rumelhart, Hinton y Williams (1986) es una de las RNA más ampliamente utilizadas (Pijanowski *et al.*, 2002a). Consiste en tres tipos de capa: entrada, oculta y salida (figura 1) y es capaz de identificar relaciones de naturaleza no lineal.

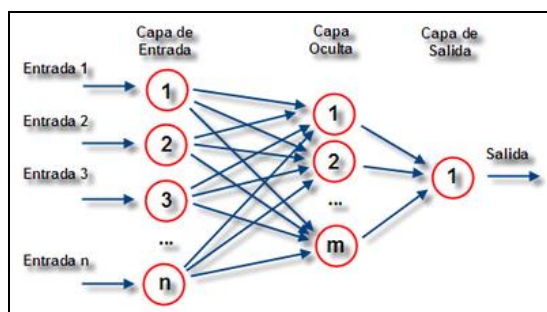


Figura 1. Esquema de funcionamiento de MLP.

Fuente. Manual de ayuda IDRISI Taiga.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

La capacidad de las RNA para la mencionada resolución de problemas de búsqueda y reconocimiento de patrones, es decir, del reconocimiento repetitivo de un comportamiento determinado a lo largo de una secuencia temporal, originó su aplicación en la modelización de la dinámica espacio-temporal de los cambios de usos de suelo, pudiendo encajar en la categoría de modelos de probabilidad de cambio de usos de suelo espacialmente explícitos, basados en modelos de regresión (Pijanowski *et al.*, 2002a). Las RNA, tienen en común con los modelos de regresión logística para evaluar la probabilidad de cambio de usos de suelo, que establecen relaciones funcionales entre una serie de variables que en cierto modo tienen poder explicativo para la localización de los cambios (Díaz Pacheco, 2011).

El uso satisfactorio de RNA para la modelización de cambio de usos de suelo ha sido probado con éxito en varias aplicaciones, como las llevadas a cabo para la modelización de crecimiento urbano en distintas regiones de Estados Unidos, como el Grand Traverse Bay Watershed, Michigan (Pijanowski *et al.*, 2002a), y la zonas de Detroit y Twin Cities (Pijanowski *et al.*, 2005). También fue aplicado un modelo basado en RNA para analizar los patrones de usos de suelo urbano en la región de Madrid, prestando especial atención a la localización de las grandes superficies comerciales (Díaz Pacheco, 2011).

Dada la capacidad de los modelos de RNA para localizar los patrones de localización de usos de suelo, esto es, la aptitud de un determinado enclave espacial para alojar una determinada categoría de uso de suelo dentro de un sistema de categorización previa, también están sirviendo de apoyo a otros modelos de simulación de cambio de usos de suelo, como los basados en autómatas celulares y los modelos basados en agentes. Almeida *et al.* (2008) han desarrollado un modelo dinámico de cambio de usos de suelo que emplea RNA para calcular de manera dinámica el factor de aptitud, que ha sido ya probado en la ciudad de Piracicaba, en el estado de Sao Paulo, Brasil.

El uso de RNA aplicado al campo de la simulación dinámica de usos de suelo se plantea, más como una herramienta predictiva para la localización futura de usos de suelo, que como un método para generar la aptitud de una determinada localización espacial en el territorio para acoger un determinado uso de suelo, a través de la detección de patrones de comportamiento extraídos de la comparación de dos momentos temporales más o menos distantes entre sí.

3. Área de estudio

La Comunidad de Madrid en 2009 contaba ya con 6.386.932 habitantes de los cuales el 90% pertenece a los 27 municipios que conforman la que fue denominada de manera oficial en 1963 área metropolitana de Madrid. Actualmente esta delimitación oficial no existe y el conjunto de estos 27 municipios (frente a los 179 que componen la Comunidad Autónoma) resulta escueta para explicar las transformaciones que tienen lugar en la región. No obstante, existe una diferenciación espacial en cuanto al dinamismo de transformación de los usos de suelo, conglomerados de actividades, densidades de población, diferencias de accesibilidad, densidad de espacios naturales, proporción de suelo urbano, diferenciaciones sobre los patrones de desarrollo,

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

etc. (Díaz Pacheco, 2011). En los últimos diez años, la región de Madrid se ha comportado de forma extraordinariamente dinámica. Este dinamismo ha sido objeto de diversas investigaciones, véase por ejemplo, Lopez de Lucio (2011, 2000), García Palomares y Gutiérrez Puebla (2007), Santiago Rodríguez (2011) y Naredo y Zaldívar (2008), entre muchas otras. Sin intención de realizar una extensa discusión acerca del citado dinamismo, algunos de los puntos clave se detallan a continuación de forma muy breve para el periodo temporal que se explora en este trabajo.

Entre 2000 y 2009 la población aumentó en casi 1,18 millones de habitantes, pasando de 5,2 a 6,38 millones de habitantes, lo que supone un crecimiento demográfico del 2,5% anual. El crecimiento demográfico ha ido acompañado del consiguiente crecimiento de la ocupación del suelo por usos urbanos, que pasa de 89.165 ha en 2000 a 106.436 ha en 2009. Ambos crecimientos relativos mantienen su incremento entre los periodos 2000-2006 y 2000-2009, si bien es cierto que a partir del año 2006 se produce un crecimiento menor de la ocupación del suelo (2,4% anual entre 2000-2006 y un 1% anual entre 2006-2009). Por último, es interesante destacar a este respecto, como la ratio de habitantes por metro cuadrado mantiene valores similares para cada periodo observado, presentando un descenso de casi un 1% para cada periodo observado (tabla 1). Estos datos son de utilidad tanto para la presentación del área de estudio como para el cálculo de demanda de uso de suelo anual requerida por los modelos discutidos aquí.

Tabla 1. Crecimiento de la población y usos de suelo urbano. Comunidad de Madrid

	2000	% Crec.	2006	% Crec.	2009
Población	5.207.408	15,42	6.010.189	6,30	6.388.941
Ha Suelo Urbano	89.165	14,45	102.052	4,30	106.436
m²/hab.	171	-0,99	169	-0,98	166

Fuente. INE. MLU.

Respecto a la localización de los cambios de usos de suelo, en base a un primer análisis cartográfico, se observa como la distribución de los cambios de usos de suelo en la región reproducen las pautas espaciales tradicionales de Madrid. Una fuerte polarización hacia la ciudad central con un despliegue hacia el exterior de la región que expone una clara relación con la cercanía a la red de transporte de alta capacidad. Obviamente los cambios de usos de suelo en la denominada almendra central (interior de la primera vía de circunvalación del municipio de Madrid, M-30) no responden a esta pauta, debido fundamentalmente al agotamiento de suelo urbanizable disponible (ver figura 2).

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

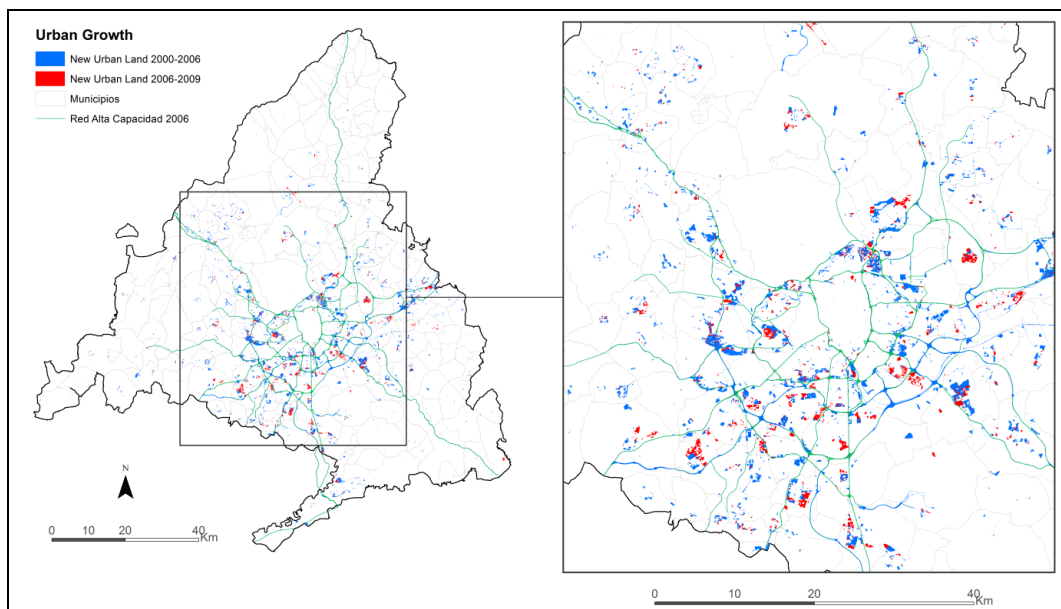


Figura 2. Crecimiento del suelo urbano en Madrid 2000-2006 y 2006-2009.

Fuente. MLU.

A través de un análisis de tendencia, se ajustaron los cambios de usos de suelo urbano en el espacio en base a una representación gráfica de un polinomio de tercer grado (figura 3). Una vez normalizados los valores de tendencia entre 0 y 1, puede observarse como dentro de la Comunidad de Madrid existe un mayor dinamismo de cambio de usos de suelo urbano (ocupación de suelo) hacia los sectores sureste y suroeste del área metropolitana. Entre los usos de suelo residencial multifamiliar y residencial unifamiliar se observa una variación en los valores altos de tendencia, donde estos últimos parecen alargarse hacia el noroeste, debido a la extensión que ocupan los cambios hacia este uso en la dirección de la autopista A-6, donde efectivamente predominan los desarrollos de baja densidad y urbanizaciones unifamiliares. El comportamiento tendencial de los equipamientos y servicios es muy similar al del uso de residencial multifamiliar, mientras que la tendencia de los cambios de uso de suelo a centros comerciales y las grandes plataformas de oficinas se asemeja más a los de cambios de uso de suelo residencial unifamiliar.

El comportamiento tendencial de los equipamientos y servicios es muy similar al del uso de residencial multifamiliar, mientras que la tendencia de los cambios de uso de suelo a centros comerciales y grandes plataformas de oficinas se asemeja más a los de cambios de uso de suelo residencial unifamiliar. Cabe destacar en estos mapas de tendencias espaciales de cambio, la disposición de los valores más altos para el suelo industrial, claramente orientada hacia el sector sureste del área metropolitana, posteriormente también se refleja en la pauta tendencial general del cambio hacia uso de suelo urbano.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

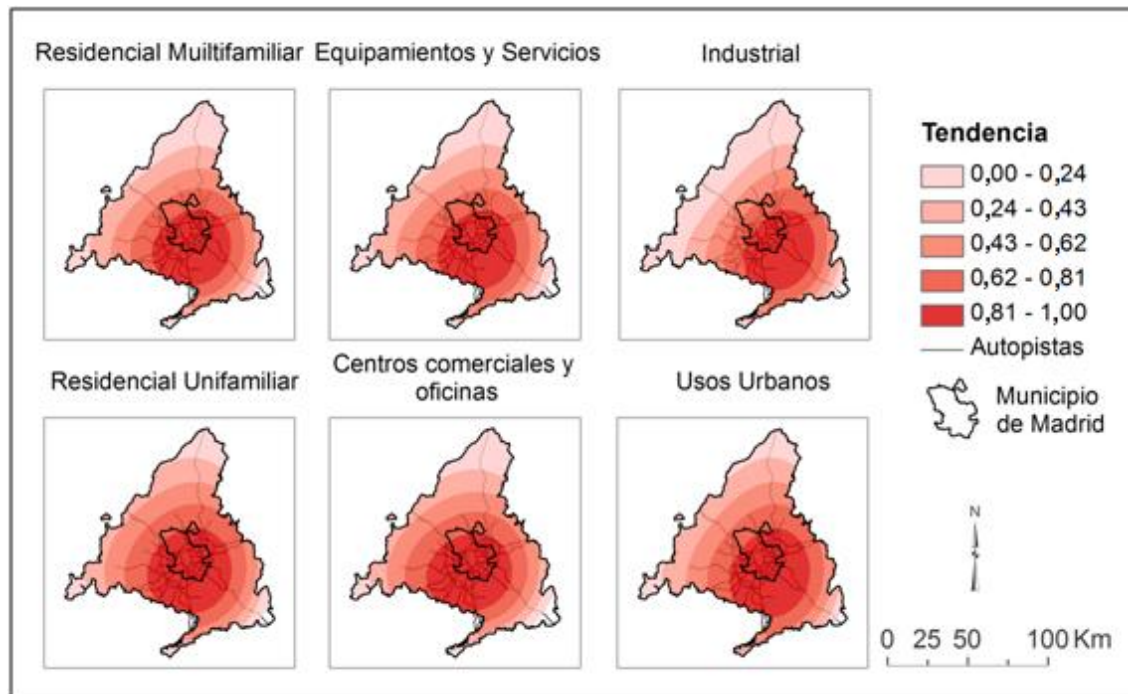


Figura 3. Tendencia espacial de ocupación de suelo en la región de Madrid 2006-2009.

Fuente: MLU.

4. Fuentes y metodología

4.1. Fuentes

Todo estudio de análisis espacio-temporal de cambio de usos de suelo, se basa generalmente en el cambio de usos y ocupación de suelo, observado entre dos o más periodos temporales sobre los que se dispone información. Para este trabajo se requería el uso de una base de datos geográfica de usos de suelo construida a una escala adecuada que permitiera la diferenciación de los distintos usos de suelo urbano. Investigadores del Departamento de Geografía Humana de la Universidad Complutense de Madrid, en función de cubrir las necesidades de información sobre la evolución usos de suelo urbano que requerían sendos proyectos de investigación, han venido elaborando desde el año 2000 una base de datos geográfica de escala local denominada *Madrid Land Use (MLU)*¹. Esta base de datos ha estado centrada en recabar datos sobre la evolución de los estados de usos de suelo urbanos en la región integrada dentro de los límites político-administrativos de la Comunidad Autónoma de Madrid, para los momentos temporales de referencia 2000, 2006 y 2009. La captura de datos ha sido realizada a una escala de gran detalle, estableciéndose referencialmente en 1:10.000. Los procesos técnicos no cuentan con ninguna tarea

© Los autores

www.geo-focus.org

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

de clasificación automática o asistida por ordenador, realizándose en su totalidad a través de foto-interpretación de orto-fotografías aéreas de alta resolución (1x1 m), combinadas con apoyo de información cartográfica de gran escala (1:1.000 y 1:5.000) y elaborada por instituciones públicas oficiales con diferentes objetivos.

MLU se ha centrado inicialmente en la diferenciación de usos de suelo urbano, esto significa que para aquellas estructuras no explícitamente de carácter artificial-urbano (cultivos, prados, bosques, áreas degradadas...) no realiza ninguna clasificación más que su identificación como área no urbana (no construida o de uso no artificial). Para su utilización, MLU se ha convertido desde estructura vectorial a una estructura raster de 50x50 m. de celda, mediante un método de conversión directa donde el valor de cada celda de la tesela o GRID adquiere el valor del polígono vectorial que intersecta con el centro de cada celda.

MLU cuenta originalmente con una clasificación detallada de unos 12 usos de suelo, los cuales han sido agregados en 7 usos atendiendo a los objetivos del presente trabajo. Los usos de suelo son: residencial unifamiliar, estructuras formadas por conjuntos de viviendas de una o más unidades, generalmente de planta baja, sin tener en cuenta la densidad de ocupación; residencial multifamiliar, estructuras constructivas destinadas mayormente a residencia y diferenciadas de la vivienda unifamiliar por albergar un colectivo de unidades habitacionales (edificio de viviendas); industrial, que engloba los espacios construidos dedicados a esta actividad; equipamientos y servicios, todas aquellas estructuras edificadas o no, dedicadas a servicios colectivos (iglesias, parque de bomberos, asociaciones de vecinos, instalaciones hoteleras, estadios deportivos, centros educativos...); centros comerciales y oficinas, son las grandes estructuras, generalmente periféricas o suburbanas, que albergan los grandes centros comerciales y aquellos grandes espacios de concentración de oficinas y ciudades empresariales; verde urbano, que engloba todas las grandes áreas verdes urbanas, parques e incluso plazas o lugares públicos y abiertos de superficie superior a 500 metros cuadrados y por último infraestructuras, que representan el espacio ocupado por la red de transporte principal, aeropuerto y grandes ejes viales urbanos.

La elaboración de algunas variables que participan en los modelos, como la accesibilidad a la población, la densidad de población o la accesibilidad al empleo fueron construidas en base a datos procedentes del Instituto Nacional de Estadística español y del Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

4.2. Metodología

Para llevar a cabo este trabajo fueron desarrolladas un conjunto de tareas de ejecución recogidas en dos bloques. En el primer bloque se describe el procedimiento del modelo de simulación de usos de suelo basado en RNA que emplean las dos aplicaciones, LTM y LCM, para el cálculo de los modelos de transición potencial. En el segundo bloque se detalla el método utilizado para la comparación de los resultados.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

A) Descripción del modelo de simulación de cambios de usos de suelo urbano basado en RNA.

De manera general, lo que pretende el modelo de simulación de usos de suelo basado en RNA es reproducir los patrones de funcionamiento de los cambios de usos de suelo urbano. Este estudio se centra en los cambios de usos de suelo no urbano hacia unas determinadas categorías de suelo urbano (residencial multifamiliar, residencial unifamiliar, equipamientos y servicios, centros comerciales y oficinas, y suelo industrial). Para ello a partir de dos periodos temporales conocidos de la situación de los usos de suelo de una región (2000, 2006), se tratan de reproducir los patrones de cambio de usos de suelo para luego, utilizando estos patrones, ejecutar simulaciones a periodos temporales posteriores. Para validar la simulación se cuenta con otro periodo temporal, en este caso 2009.

LTM y LCM son dos aplicaciones informáticas diseñadas para el cálculo de probabilidad de cambio de cobertura/uso de suelo basadas en RNA. Ambos softwares incorporan una serie de procedimientos similares para producir un resultado de simulación de cambio de usos de suelo. Entre estos procedimientos, la definición de los patrones de localización de los usos de suelo son el núcleo del modelo, y donde se emplea el algoritmo basado en RNA. En este trabajo se comparan los resultados obtenidos mediante la ejecución de este algoritmo implementado en LTM y el algoritmo implementado en LCM. El resto de procedimientos se han llevado a cabo en LCM, debido a las ventajas que incorpora este módulo a la hora de realizar los mapas finales simulados. Es importante destacar que, aunque el proceso final de asignación de usos de suelo para la simulación de 2009 se realiza dentro del módulo LCM (Land Change Modeler), el entrenamiento de la red neuronal de este modelo se llevó a cabo de manera completamente independiente en la aplicación LTM (Land Transformation Model).

A continuación se enumeran y posteriormente se detallan los procesos llevados a cabo:

- 1) Análisis de los cambios de usos de suelo.
- 2) Cálculo de la demanda anual de usos de suelo.
- 3) Selección de las variables.
- 4) Definición de las reglas, patrones o sub-modelos de transición.
- 5) Simulación de los usos de suelo.
- 6) Validación.

1) Análisis de los cambios de usos suelo. Consiste en realizar un análisis exploratorio de la evolución de los usos de suelo entre los periodos de referencia seleccionados (2000-2006). Cada uno de los usos de suelo corresponde a uno de los denominados estados celulares (categoría de uso de suelo) o de cada celda de la información raster y mediante este análisis se observan donde se están produciendo principalmente los cambios de uso de suelo dentro de la región de estudio. Esta información complementa los datos teóricos previamente estudiados sobre la dinámica de usos de suelo y sirve para ayudar a deducir cuales podrían ser las variables que pueden tener implicación en el cambio de cada uno de los usos de suelo activos modelados (ver tabla 2).

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Tabla 2. Clasificación de los estados funcionales de usos de suelo

Usos de suelo	Nomenclatura	Estado Funcional
Residencial Multifamiliar	Multi-household	Activo
Residencial Unifamiliar	Single-household	Activo
Industrial	Industrial	Activo
Equipamientos y servicios	Facilities	Activo
Centros comerciales y oficinas	Office and Retail	Activo
Verde Urbano	Urban green	Fijo
Infraestructuras	Infrastructures	Fijo
Suelo no urbano	Non - urban	Pasivo

Fuente: Adaptado de Díaz-Pacheco (2011).

2) Cálculo de la demanda anual de usos de suelo. En los modelos de simulación de usos de suelo se denomina demanda a la cantidad de células (superficie) que necesita el sistema en cada iteración (cada año) para cada uno de los estados activos de usos de suelo. En este trabajo se han empleado para calcular esta demanda una tasa simple de crecimiento anual (tasa de crecimiento anual compuesto) de acuerdo al crecimiento urbano mantenido entre 2006 y 2009.

3) Selección de las variables. Para cada uno de los cambios de usos de suelo que se quieren simular, deben seleccionarse un número de variables cuyo patrón espacial manifieste algún tipo de comportamiento que el investigador crea que puede tener relación con el patrón de localización de cada uno de los cambios de usos de suelo que se quieren simular. Generalmente se recomienda tener entre 6 y 15 variables (Pijanowski *et al.*, 2005) cuidadosamente elegidas por su capacidad potencial de explicar la ubicación de los cambios de usos de suelo. Estas variables se pueden denominar aptitud, o *suitability* [(Pijanowski *et al.*, 2005); (RIKS, 2011)], y suelen consistir en variables biofísicas (pendiente, temperatura media anual, precipitación media anual...) o socio-económicas (proximidad a carreteras principales, proximidad a áreas residenciales, precio del suelo, proximidad entre los mismos usos de suelo...). El éxito del modelo dependerá del potencial de las variables elegidas para explicar la ubicación de los nuevos usos. Obviamente, las variables explicativas más apropiadas variarán en función de la categoría del tipo de cambio de uso de suelo que se quiere modelar y de la región modelado; por ejemplo, la ubicación de cultivos en secano dependerá mucho más de la precipitación media anual que la proximidad a áreas residenciales, pero esto último podría tener un poder explicativo alto en caso de modelización de expansión de viviendas unifamiliares alejadas de la ciudad véase (Schneider and Gil Pontius, 2001).

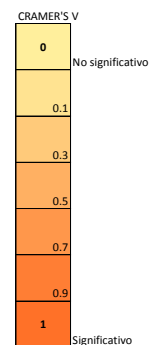
En la aplicación LTM, la idoneidad en la elección de las variables elegidas se determina una vez termina el proceso de simulación, sin embargo, en la aplicación LCM, las variables que intervienen en cada sub-modelo de transición son seleccionadas previamente a través de la V de Cramer, un test de correlación que permite calcular la fuerza de relación entre variables que pueden presentarse en una tabla de contingencia mayor a 2x2. La V de Cramer es una prueba complementaria al test chi-cuadrado, generalmente utilizado para encontrar el grado de libertad en el comportamiento de dos variables aleatorias. Esta última informa de si existe un significado de relación entre dos variables, pero no señala la fuerza de relación, como lo hace el test de la V de Cramer.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

En este trabajo se ha optado por realizar el test previo que ofrece la aplicación LCM, utilizando posteriormente las mismas variables para la ejecución de los modelos en ambas aplicaciones. En la tabla 3, se presenta una matriz con los valores resultantes para esta fuerza de relación entre las variables sometidas al test. Los valores van de 0 a 1, donde el 0 significa ausencia de relación. En los encabezados de las filas se sitúan las variables seleccionadas para el testeo y en los encabezados de las columnas se disponen los distintos usos de suelo. Se ha utilizado una escala gráfica individual para cada uso de suelo, para identificar las variables más significativas en cada sub-modelo. Las variables seleccionadas para cada sub-modelo, son aquellas que presentan una fuerza de relación superior a 0,1 (valor en negrita en tabla 3).

Tabla 3. Presentación de las variables exploradas y seleccionadas a través de la V de Cramer

Change toward.../Variables	Overall Analysis Cramer's V	P Value	Office-Retail	P Value	Residential Singlehousehold	P Value	Residential Multihousehold	P Value	Industrial	P Value	Facilities	P Value
Distancia a equipamientos	0.1190	0	0.3898	0	0.3467	0	0.5467	0	0.2483	0	0.1352	
Densidad de población 2005	0.1327	0	0.2461	0	0.5123	0	0.5306	0	0.1432	0	0.1881	
Distancia al municipio de Madrid	0.1058	0	0.2059	0	0.3708	0	0.4436	0	0.0503	0	0.1337	
Accesibilidad a la Población	0.1880	0	0.1990	0	0.4749	0	0.4421	0	0.0852	0	0.1375	
Distancia al verde urbano	0.1382	0	0.1989	0	0.2794	0	0.4788	0	0.1955	0	0.1398	
Accesibilidad al Empleo	0.1033	0	0.1976	0	0.3505	0	0.4409	0	0.0541	0	0.1556	
Distancia a Centros Comerciales	0.1029	0	0.1865	0	0.3076	0	0.4940	0	0.1840	0	0.1556	
Distancia a Rampas	0.0969	0	0.1587	0	0.1991	0	0.3857	0	0.0935	0	0.1507	
Distancia a vías de gran capacidad	0.0830	0	0.1384	0	0.1716	0	0.3298	0	0.0828	0	0.1237	
Distancia a suelo urbano	0.0880	0	0.1022	0	0.1068	0	0.2716	0	0.1656	0	0.0972	
Distancia a Residencial Un.	0.0863	0	0.0939	0	0.1125	0	0.2623	0	0.2069	0	0.0519	
Pendiente	0.0688	0	0.0778	0	0.1006	0	0.2114	0	0.0751	0	0.1015	
Distancia a suelo industrial	0.0876	0	0.0742	0	0.1200	0	0.2569	0	0.1056	0	0.1620	
Distancia a carreteras	0.0437	0	0.0290	0	0.0910	0	0.0247	0	0.0587	0	0.0299	



Fuentes: MLU, INE, Instituto de Estadística de la Comunidad de Madrid.

4) Definición de las reglas, patrones o sub-modelos de transición. Las reglas o sub-modelos de transición conforman el elemento clave del modelo, ya que estas determinan que células mutarán de estado, o en definitiva qué áreas podrán ser ocupadas por uno u otro de los usos de suelo. Para cada uno de los tipos de cambio (no urbano-equipamiento, no urbano-residencial, no-urbano-industrial, etc.) se genera un mapa de transición a través de un único sub-modelo. En la definición de estas reglas o patrones de cambio es donde interviene el uso de las RNA para el cálculo de los valores de transición potencial. Tanto LCM como LTM, incorporan el algoritmo perceptrón multicapa (MLP, de *multilayer perceptron*) para el cálculo de transición potencial. En este trabajo se han utilizado ambas aplicaciones en función de comparar los resultados de simulación producidos por las mismas.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

El algoritmo MLP contiene tres tipos de capas: capa de entrada, capa oculta y capa de salida. Los datos de entrada pasan a través de la red mediante un proceso denominado *feed forward* (alimentación hacia delante), donde los nodos de salida son calculados en función de los valores de entrada y posteriormente transmitidos hacia delante a través de la red. La respuesta de activación (si un nodo es estimulado o no) depende de los valores de entrada o pesos utilizados. Este proceso de búsqueda de los valores correctos se conoce como *learning rule* (regla de aprendizaje). La búsqueda de los valores correctos para las ponderaciones se hace efectiva utilizando un paradigma de aprendizaje denominado *supervised learning* (aprendizaje supervisado), (Noriega, 2005).

El modelador de cambios de usos de suelo de suelo Land Transformation Modeler (LTM), busca relaciones entre la ubicación de una categoría en el mapa inicial (M1) y las llamadas variables explicativas o de predicción, distancia desde la red de carreteras, pendiente, altitud etc. a través de las redes neuronales artificiales. Primero, se genera una red neuronal apropiada al mapa y al número de variables explicativas, luego se entrena el modelo a través de varias iteraciones de la red neuronal, y a continuación se aplican las normas de colocación obtenidas del proceso de entrenamiento para realizar un mapa simulado MS2. La comparación entre el mapa simulado MS2 y el mapa original M2 indica el grado de ajuste entre los mapas y por lo tanto la exactitud obtenido por el modelo. Cuando se alcanza un grado de ajuste satisfactorio se puede proceder a la simulación de mapas posteriores M3,M4,...,Mn.

La representación de este proceso, generalmente ilustrado por una serie de conexiones de red a través de nodos (ver figura 1) puede resultar más fácil de entender si se piensa en las capas de ponderación como en una matriz de valores, la cual, cuando se le aplica la conexión con el nodo de entrada, determina la respuesta de activación del nodo de salida. La localización del valor de ponderación determinado para aplicar a la capa de entrada para producir la salida esperada es, de hecho, la clave del algoritmo. El perceptrón multicapa es capaz así de encontrar los pesos adecuados en un proceso que comienza por la aplicación aleatoria de una serie de valores de ponderación a la capa de entrada (distancia conocida a la localización de una determinada clase de uso de suelo en el tiempo t_0), para luego compararlos con la capa de salida esperada (distancia conocida a la localización de esta clase de suelo en el tiempo t_1). Una vez todos los nodos han sido incorporados a la red neuronal, el error cuadrático medio observado y esperado se calcula para todas las observaciones y los valores de las matrices de ponderación se ajustan, por lo que el error se distribuye uniformemente en toda la red.

La totalidad de este proceso de incorporación de valores de ponderación de entrada a la red, evaluación del error de conjunto y posterior distribución del error en la red se conoce como ciclo (*cycle*). Después de cierto número de ciclos se alcanza un umbral de ajuste (generalmente alrededor de entre 4.000 a 10.000 ciclos), donde los valores de salida comienzan a producir muy pocas mejoras respecto al nivel de error calculado. El proceso entonces se detiene y los valores de ponderación obtenidos se guardan para posteriormente aplicarse al archivo que contiene solamente los nodos de entrada donde los valores de salida son calculados.

En el modelo desarrollado en este trabajo se han designado ocho estados de célula de 50x50 m. de tamaño, es decir, cada célula representa 2500 m² de superficie. Siete de estos estados

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

clasifican el suelo urbano: "residencial multifamiliar, residencial unifamiliar, industrial, centros comerciales y oficinas, equipamientos y servicios, verde urbano e infraestructuras" y un estado de suelo representa el suelo no urbano, para clasificar a todos aquellos que no tienen un carácter urbano estricto (agrícola, espacios naturales, áreas de extracción minera, solares urbanos no edificados...). Estos estados reciben una nomenclatura para ser tratados en el modelo. Además, los estados también reciben propiedades funcionales (ver tabla 2). Los estados activos son aquellos a los que las células pueden mutar; luego los estados fijos, que permanecen inmutables y hacia los que ninguna célula puede mutar; y por último las células en estado pasivo que pueden mutar hacia alguno de los estados activos. Cabe la posibilidad de que un estado activo también pueda ser sustituido por otro estado activo, pero en este trabajo este tipo de cambios no ha sido simulado, por lo que el único estado que puede mutar hacia otro uso es el suelo no urbano.

5) Simulación de usos de suelo. La ejecución de los sub-modelos permite entonces contar con un mapa de potencial de transición para cada uso de suelo, donde cada unidad espacial (célula) adquiere un valor de aptitud para mutar hacia un determinado estado de uso de suelo o permanecer estable en cada iteración (periodo de 1 año). Cada momento de referencia temporal ($t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$), el número de células demandadas (superficie) para cada uso modelado ocupa su lugar. Este proceso se repite iterativamente hasta alcanzar el año en el que se quiere realizar la validación, en este caso 2009. Esta operación se realiza a través del modelo de asignación denominado MOLA (Multi-objective Land Allocation), implementado también en el módulo LCM del software SIG utilizado. MOLA asigna una localización para cada célula que aplica una versión del procedimiento del *Punto ideal* [Barredo, 1996, citado en (Bosque y García, 2000)]. A través de dicho procedimiento, MOLA resuelve conflictos de asignación cuando dos o más células coinciden en los valores de transición potencial para albergar estado de uso de suelo concreto. LTM también incluye en su aplicación un módulo que realiza la asignación de los cambios de usos de suelo en función de los valores de transición, pero de manera más simple que en el procedimiento MOLA de LCM, ya que no es capaz de tomar decisiones de asignación de localización de usos de suelo entre varias categorías de usos de suelo. Además, aunque en este trabajo se ha prescindido de ello, para poder comparar ambas aplicaciones, LCM permite realizar una asignación dinámica. Esto quiere decir que en cada etapa de asignación (cada año) puede volver a recalcular los mapas de transición celular en base a las variables dinámicas. El carácter estático de estas variables puede afectar a simulaciones realizadas a largo plazo, si bien para el objetivo de este trabajo para la observación que realiza una simulación a 3 años, el carácter estático de los valores de potencial no genera grandes diferencias en los resultados.

6) Validación. Una vez obtenidos los mapas simulados de usos de suelo estos deben someterse a un proceso de validación. Se entiende el proceso de validación como una valoración objetiva del grado de ajuste de las reglas establecidas por el modelo basado en RNA, y no una confirmación automática de la aplicabilidad de los resultados del trabajo. Por lo tanto, un modelo *validado* no es necesariamente un buen modelo, si bien esta es una cuestión que no va a ser aquí tratada. Inicialmente la validación se realiza de manera visual, pero posteriormente la simulación se compara a través de métodos estadísticos con el mapa "real" (datos), en este caso 2009, para poder confirmar la validez del modelo. No existe un método universalmente aceptado para la comparación de mapas, si bien es cierto que cada vez existen más algoritmos que son capaces de imitar la

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

capacidad humana para diferenciar dos imágenes. En este trabajo, se ha recurrido para comparar los resultados de las simulaciones al software Map Comparison Kit (MCK) desarrollado en Holanda por el Research Knowledge System Institute (RIKS).

Comparación de los resultados

Una vez han sido validados los resultados de la simulación obtenidos utilizando ambas aplicaciones (LTM y LCM) para el cálculo de los mapas de transición potencial. Estos resultados de validación son comparados con el fin de evaluar el grado en que cada uno de los algoritmos de búsqueda patrones han conseguido simular los patrones de urbanización en el área de estudio, tal y como se ha presentado en la figura 4.

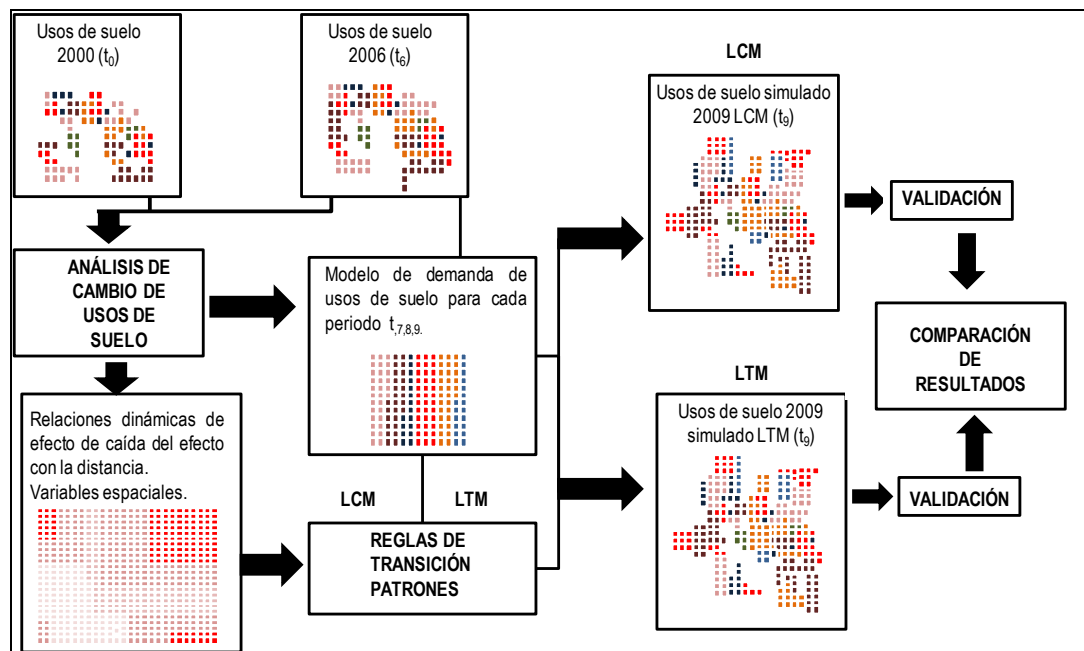


Figura 4. Esquema de funcionamiento del modelo y comparación de resultados.

Fuente: Adaptado de Díaz-Pacheco (2011).

5. Resultados y conclusiones

5.1. Resultados

Los dos modelos han simulado de manera realista el crecimiento urbano de las distintas categorías en las áreas donde se ha producido crecimiento de este tipo. Por ejemplo, con referencia a la figura 5, se observa que los dos modelos predijeron correctamente la ampliación de las zonas de

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

residencia multifamiliar (sin la inclusión de ningún tipo de zonificación en el modelo) en una nueva urbanización del noreste de Madrid (Sanchinarro).

Idrisi-LCM tendió a producir más opciones para el crecimiento futuro que su homólogo, es decir, los resultados de LCM señalaron una gama más alta de valores de potencialidad para acoger cierto uso, mientras los resultados de LTM escogieron un área más limitada. Esta cuestión, puede haberse producido por el método de muestreo que realiza la RNA en Idrisi-LCM, cuya cantidad de puntos de muestreo escogida fue la misma que la cantidad de células que mutaron para cada categoría de uso de suelo entre 2000 y 2006. En el caso de LTM, si bien este ofrece la posibilidad de trabajar con una serie de muestras, la herramienta por defecto trabaja explorando la totalidad del espacio celular. Esta cuestión no afecta cuando la demanda de cada uso de suelo no supera unos umbrales, como en el caso de este trabajo, donde todas las células demandadas encuentran una ubicación entre los valores de transición potencial que resulta en la aplicación LTM.

A pesar de esas diferencias en la manera de localizar los nuevos usos simulados empleados por las distintas aplicaciones, hubo bastante acuerdo entre las dos simulaciones en determinadas zonas. En la figura 5 se expone como ejemplo el caso de los desarrollos de suelo industrial del municipio de Pinto, donde las dos simulaciones detectaron correctamente una alta aptitud para suelo industrial.

A pesar de la mencionada similitud entre las simulaciones, sí es cierto que resulta sorprendente el grado de diferencia entre las dos aplicaciones, dado que empleaban exactamente la misma técnica sobre los mismos mapas de suelo y las mismas variables explicativas. Este resultado indica la necesidad de ser cauto a la hora de recurrir a una técnica de modelización implementada en uno u otro software en base a su supuesta eficiencia o idoneidad frente a otros. No obstante, observando algunos estadísticos de comparación de mapas, como kappa y kappa simulación, así como el índice fractal de cada mapa simulado respecto al mapa de datos "reales", la calidad de los resultados de simulación producidos por las diferentes aplicaciones es bastante similar. Además, ambos modelos presentan mejores resultados que la generación de mapas aleatorios, tanto en las comparaciones estadísticas como en la comparación de la geometría fractal (tabla 4).

En cuanto al grado de diferencia al que se ha hecho referencia, respecto a la localización simulada del cambio de usos de suelo urbano por ambas aplicaciones, esta puede observarse mejor comparando por categorías las diferencias de localización de los cambios entre el mapa de datos "reales" y los mapas simulados. En la figura 6 se expone la superposición de las simulaciones con los datos con ejemplos de las clases de suelo residencial y la clase industrial. Los colores azul y rojo representan los errores, y claramente puede verse como muchos cambios se simulan con el mismo grado de error por ambas aplicaciones. Sin embargo, a veces LCM, por ejemplo, simula en exceso algún uso de suelo en algún área, mientras LTM no lo hace. En la simulación de suelo residencial unifamiliar puede observarse claramente este ejemplo (figura 6). Esto posiblemente se deba al tipo de gradiente de valores de transición que generan cada una de las aplicaciones. De hecho, al observar los mapas de transición potencial en LCM, estos mostraron un descenso más gradual y suave que en LTM, donde a partir de cierto umbral, se produce una caída brusca de los valores de transición potencial.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

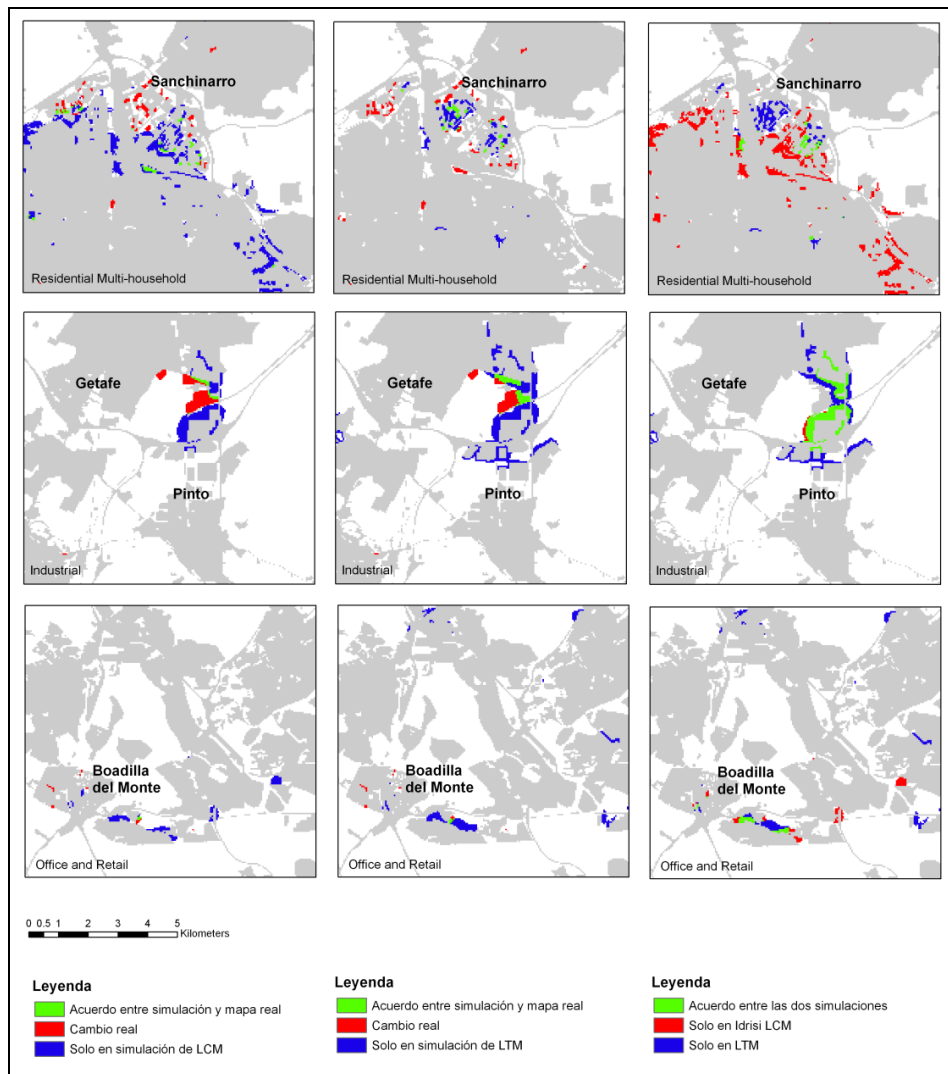


Figura 5. Resultados de simulaciones para el año 2009. Columnas: izquierda, LCM y mapa real; centro, LTM y mapa real; derecha, comparación LCM-LTM. Filas: Arriba, residencial multifamiliar; centro, suelo industrial; abajo, centros comerciales y oficinas.

Fuente: MLU.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, n° 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Tabla 4. Índices estadísticos (arriba) y diferencia en índice de fractalidad (abajo)

Índices Kappa y Kappa simulación

Maps 2009	Kappa	Kappa Sim
LTM	0.966	0.067
LCM (Idrisi)	0.962	0.078
Random map 1	0.956	0.052
Random map 2	0.956	0.052
Random map 3	0.955	0.053

Índice Fractal (Real Map = 1.4324)

Maps 2009	Fractal index	Difference
LTM	1.4308	-0.0016
LCM (Idrisi)	1.4304	-0.0020
Random map 1	1.4509	0.0185
Random map 2	1.4808	0.0484
Random map 3	1.4508	0.0184

Fuente: MLU.

Los modelos de cambio de usos de suelo basados en redes neuronales, tal y como se ha observado en este trabajo, a pesar de que a veces se presentan como una herramienta predictiva para simular con precisión espacial los lugares donde se va a manifestar algún tipo de cambio de usos de suelo, funcionan realmente como prototipos excelentes para localizar patrones de comportamiento, además de señalar las áreas donde potencialmente podría producirse algún cambio en el futuro de acuerdo a estas reglas localizadas. Esto quiere decir que el modelo se muestra extraordinariamente útil para señalar la aptitud de un espacio para acoger un determinado uso de suelo futuro de acuerdo a sus patrones anteriores. Sin embargo, del mismo modo, no puede esperarse una precisión extrema en la localización exacta de los cambios que se producen en el espacio, lo cual no debe interpretarse como un fracaso del modelo ya que el objetivo del mismo es la búsqueda de patrones generales de comportamiento y no la predicción precisa de localización. Este hecho puede observarse claramente en los resultados, donde generalmente, si bien no se produce coincidencia espacial alta en la comparación celda a celda de los mapas reales con los mapas simulados, se han producido los cambios hacia cada categoría de uso de suelo en las áreas de la región donde realmente se estaban produciendo.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

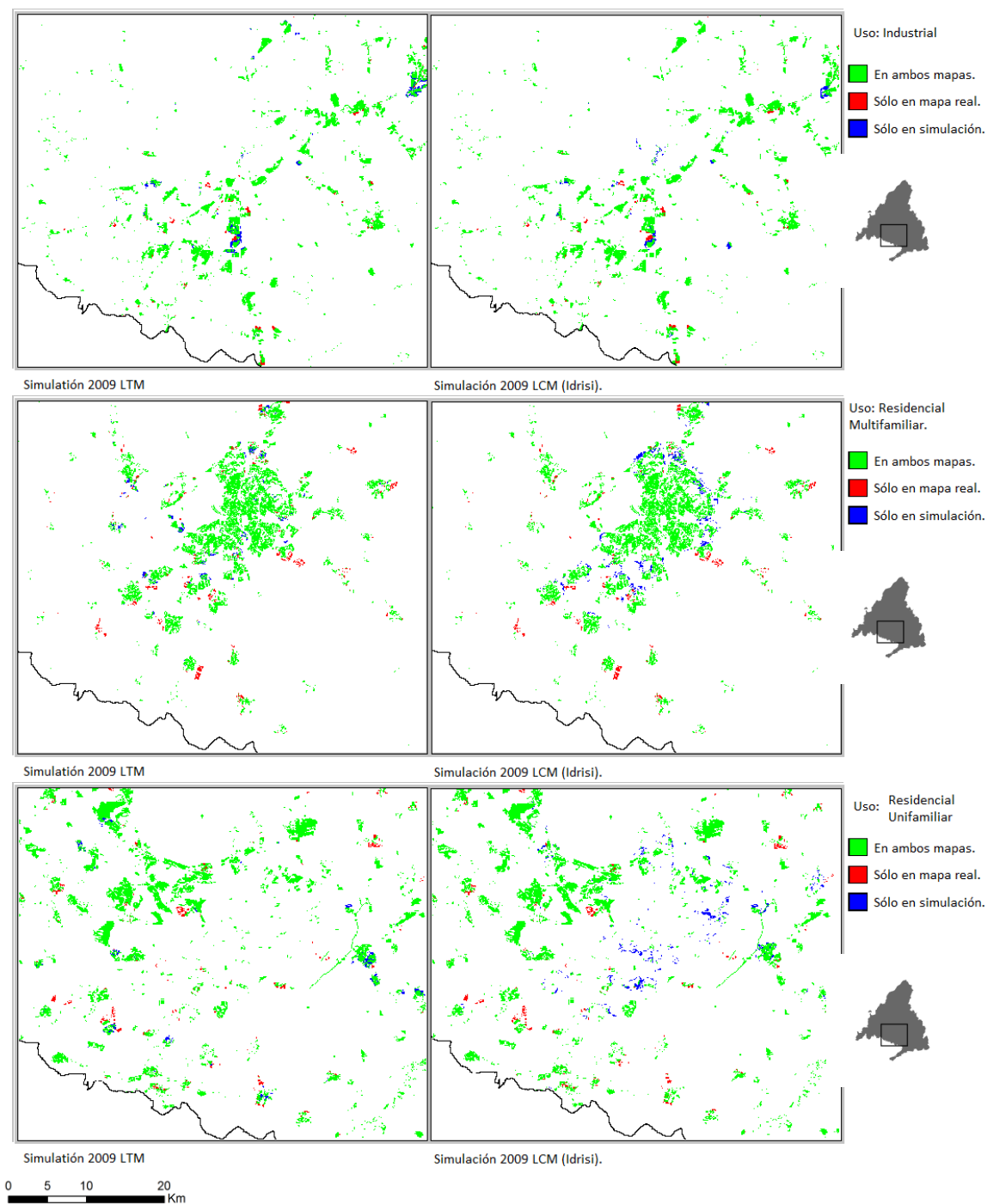


Figura 6. Superposiciones de mapas simulados con datos. Ejemplos por categorías.

Fuente: MLU.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Agradecimientos

Se muestra el agradecimiento al Organismo Autónomo de Parques Nacionales (OAPN) por la financiación recibida durante la realización de esta investigación. Así como al Plan Nacional del Ministerio de Ciencia e Innovación (TRA2005-06619/MODAL y TRA2008-06682).

Referencias bibliográficas

Aguilera Benavente, F., Valenzuela Montes, L. M., Soria Lara, J. A., Gómez Delgado & W. Plata Rocha, M. (2011): "Escenarios y modelos como instrumento en la planificación territorial y metropolitana", *Serie Geográfica*, 17, 11-28.

Aguilera, F., Valenzuela, L.M. y Bosque, J. (2010): "Simulación de escenarios futuros en la aglomeración urbana de Granada a través de modelos basados en autómatas celulares", *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, 271-300.

Aguilera Benavente, F. (2008): "Análisis espacial para la ordenación eco-paisajística de la aglomeración urbana de Granada", In *Departamento de Expresión Gráfica, Arquitectónica y en la Ingeniería*. Granada, Universidad de Granada.

Almeida, C., J., Gleriani, E., Castejon & B., Soares-Filho (2008): "Using neural networks and cellular automata for modelling intra-urban land-use dynamics", *International Journal of Geographical Information Science*, 22, 943-963.

Barredo, J. I., M., Kasanko, N., McCormick & C., Lavalley (2003): "Modelling dynamic spatial processes: simulation of urban future scenarios through cellular automata", *Landscape and Urban Planning*, 64, 145-160.

Bosque Sendra, J. & García, R.C. (2000): "El uso de los sistemas de Información Geográfica en la planificación territorial", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 20, 49-67.

Box, G. E. (1979): "Some problems of statistics and everyday life", *Journal of the American Statistical Association*, 74, 1-4.

Clavero, I., M., Santos, R., Navarro, J., Guerrero, F., Cáceres & J., Moreira 2010: "Implementación de un sistema de escenarios futuros sobre el mapa de usos de suelo de Andalucía", In *La información geográfica al servicio de los ciudadanos [Recurso electrónico]: de lo global a lo local*, 759-776. Secretariado de Publicaciones.

Díaz Pacheco, J. 2011: "Dinámica de localización de las grandes superficies comerciales y de ocio a partir de modelos basados en redes neuronales artificiales", In *Servicios, globalización y territorio: V Congreso Geografía de los servicios*, 87-118.

García Palomares, J. C. & Gutiérrez Puebla, J. (2007): "La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid", *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 45-67.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2013): "Modelado de cambios de usos de suelo urbano a través de redes neuronales artificiales. Comparación con dos aplicaciones de software", *GeoFocus (Artículos)*, nº 14, p.1-22. ISSN: 1578-5157

Gómez Delgado, M. y Rodríguez Espinosa, V. M. (2012, coord.): *Análisis de la dinámica urbana y simulación de escenarios de desarrollo futuro con tecnologías de la información geográfica*. España, RA-MA.

Hewitt, R., Hernández-Jiménez, V. & Escobar, F. (2012): *Agentes, escenarios y autómatas celulares; modelización espacial para la toma de decisiones en Doñana y su entorno*. AGE-CSIC.

López de Lucio, R. (2000): "Madrid 1979-1999. Perfiles de una transformación urbana desconocida", *Urban*, 106-123.

López de Lucio, R. (2011): "Transformaciones territoriales recientes en la región urbana de Madrid", *Urban*, 8, 124-161.

Naredo, J. M. & R. García Zaldívar (2008): "Estudio sobre la ocupación de suelo por usos urbano-industriales, aplicado a la Comunidad de Madrid", In *Madrid: Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino*.

Noriega, L. (2005): *Multilayer perceptron tutorial*. School of Computing. Staffordshire University.

Pijanowski, B. C., D. G. Brown, B. A. Shellito & G. A. Manik (2002a): "Using neural networks and GIS to forecast land use changes: a land transformation model", *Computers, environment and urban systems*, 26, 553-575.

Pijanowski, B. C., S. Pithadia, B. A. Shellito & K. Alexandridis (2005): "Calibrating a neural network-based urban change model for two metropolitan areas of the Upper Midwest of the United States", *International Journal of Geographical Information Science*, 19, 197-215.

Pijanowski, B. C., B. Shellito, S. Pithadia & K. Alexandridis (2002b): "Forecasting and assessing the impact of urban sprawl in coastal watersheds along eastern Lake Michigan", *Lakes & Reservoirs: Research & Management*, 7, 271-285.

RIKS (2011): *Documentation and resources. Description of METRONAMICA Software*. Maastricht, Netherlands: www.riks.nl.

Rodríguez, S. (2011): "Madrid, 'ciudad única'. Pautas y lógicas espaciales recientes en la región madrileña", *Urban*, 8-33.

Schneider, L. C. & R. Gil Pontius (2001): "Modeling land-use change in the Ipswich watershed, Massachusetts, USA", *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 85, 83-94.

Yu, J., Y. Chen & J. Wu. (2009): "Cellular automata and GIS based land use suitability simulation for irrigated agriculture", *18th world IMACS/MODSIM Congress*, 13-17.

¹ Esta base de datos se ha elaborado en los proyectos del Plan Nacional del Ministerio de Ciencia e Innovación TRA2005-06619/MODAL y TRA2008-06682.

BLOQUE III.- CONCLUSIONES

III.1.- CONCLUSIONES

De acuerdo a las preguntas de investigación planteadas y teniendo como referencia, tanto las cuestiones que señalan como su orden de planteamiento, se exponen a continuación una serie de conclusiones al respecto.

III.1.1.- Conclusiones respecto a las preguntas de investigación

¿Cuáles son los aspectos a considerar en la aplicación de MDUAC en regiones urbanas mediterráneas como la de Madrid?

El uso de MDUAC para la simulación del crecimiento de ciudades europeas ha tenido un desarrollo innegable en las últimas décadas, sobre todo orientados a la búsqueda de técnicas que permitan planificar nuevos desarrollos más sostenibles, y preocupados por los crecimientos caracterizados por una excesiva dispersión urbana como las señaladas por la Agencia Europea del Medioambiente respecto al 'sprawl' (EEA, 2006; 2010). El desarrollo y aplicación de MDUAC en regiones urbanas europeas, como el tratado en este trabajo, METRONAMICA/MOLAND (Lavalle et al., , 2001; Lavalle et al., , 2004; Petrov et al., , 2009; kim y Batty, 2011), SLEUTH (Silva y Clarke, 2002; Cagliioni et al., , 2006), o CLUE (Gallardo, 2014; Verburg y Overmars, 2009), son claros ejemplos del éxito e interés que suscitan estas herramientas para el estudio y el apoyo a la planificación de los cambios del uso y cobertura de suelo en Europa.

Los mencionados modelos comparten en esencia el enfoque de aplicación de la ciencia de la complejidad a las ciudades a través de los autómatas celulares, lo que también implica que a su vez compartan la característica del uso de la 'vecindad espacial' como factor clave de las dinámicas de cambio de usos de suelo que simulan. En el caso del MDUAC que se ha aplicado en este trabajo para la región de Madrid, dicho factor, unido a la accesibilidad, fueron fundamentales para desarrollar con éxito la calibración y validación del modelo.

Al tratarse de una experiencia *ad-hoc* para la región de Madrid no se dan medidas de parámetros de comparación respecto a otras experiencias de calibración, no obstante, de las conclusiones extraídas de esta investigación se consideran los siguientes aspectos a

tener en cuenta a la hora de desarrollar un MDUAC en regiones urbanas mediterráneas como la de Madrid:

1) Conocer el fondo teórico de los MDUAC.

La construcción del fondo teórico de esta investigación ha servido sobre todo para definir mejor las expectativas que deberían plantearse a la hora de emplear un MDUAC para la simulación de las transformaciones urbanas. Tanto para regiones urbanas mediterráneas como para la aplicación en otro tipo de ámbito urbano regional, es muy importante tener en cuenta que este tipo de modelos basados en autómatas celulares responden a la aceptación previa de concebir el funcionamiento dinámico de las ciudades dentro de las teorías de la complejidad. De otro modo, los trabajos con este tipo de modelos pueden causar frustración, si por ejemplo, se parte de planteamientos mecanicistas sobre la evolución urbana, o se tratan de buscar leyes inmutables de comportamiento, así como pretender encontrar exactitud en los productos de resultantes para la localización futura de los usos de suelo, a modo de ensayo probabilístico con grados de incertidumbre. Por tanto, en base a la experiencia de este trabajo, a la hora de emplear este tipo de modelos, debe considerarse previamente si el fenómeno que va a ser simulado responde a alguna de las propiedades de los sistemas complejos (ver I.4.2.-).

2) Selección de la escala/resolución de trabajo.

La escala/resolución empleada en la aplicación desarrollada para la región de Madrid es de 50x50 m. de celda, aunque se realizaron experimentos con una malla de 25x25 m. y otra malla de 100x100m., justamente con el objetivo de analizar los efectos del cambio de escala en las reglas de calibración del modelo.

Respecto a las cuestiones de proceso de computación, las celdas de 50x50 m. permiten cierta velocidad (procesador *intel core i5*), incluso para grandes regiones (Madrid abarca ocho millones y medio de celdas), sin embargo, para la agilidad de trabajo en los procesos de calibración, trabajar con celdas de 100x100 m. dan mejores resultados.

Respecto a la precisión de los resultados, indiscutiblemente para la representación cartográfica de los usos de suelo en formato raster, mayor resolución define representaciones más precisas, no obstante, es importante distinguir entre la precisión en la representación de los usos de suelo y la precisión del modelo, esta última viene derivada de la comparación de los mapas de suelo simulados y el mapa 'real' o de usos de suelo representados.

En lo que se refiere al mapa de datos para cada uno de las instantáneas del estado de distribución de los usos de suelo, en las regiones urbanas mediterráneas, para periodos temporales medios (de 5 a 10 años), si las dinámicas de transformación urbana son profusas (10.000 - 15.000 ha/año), resoluciones a partir de 200x200 m. de celda son capaces de representar estas dinámicas, como lo demuestran los trabajos realizados con CORINE Land Cover. Para periodos temporales cortos (menos de 5 años), o con bajas dinámicas de transformación urbana (menos de 5.000 ha/año), podrían requerirse resoluciones de 50x50 m. Por encima de esta escala (ej. 25x25m.), a partir de la experiencia obtenida en este trabajo, el trabajo de calibración del modelo se ralentiza en exceso para grandes regiones (Madrid abarca unos 34 millones de celdas) y no produce mejores resultados, dado el tamaño del área de estudio. En este sentido, para modelar ciudades medias o las transformaciones urbanas de un municipio, sí puede tener mayor utilidad el uso de estas escalas de gran detalle.

3) Sistematización y orden en los trabajos de calibración.

En general en Europa, el desarrollo del suelo urbano se realiza a través de planeamiento, es decir, se aprueba un plan a alguna escala administrativa que permite el desarrollo de unos determinados usos de suelo en unas zonas específicas.

4) Singularidad de las normas de vecindad.

¿En qué medida puede mejorar la observación de los cambios de usos de suelo urbano contar con una base de datos de usos de suelo de detalle?

De los trabajos de construcción de la geodatabase MLU y de su comparación con CORINE Land Cover se extrajeron nuevas aportaciones que apoyan la afirmación

acerca de la necesidad de mejorar las bases de datos geográficas de usos de suelo en entornos urbanos. Esta es, y probablemente continuará siendo, una preocupación global en cuanto al desarrollo de técnicas que permitan observar y estudiar el fenómeno de la expansión y el crecimiento de las ciudades desde la óptica de los usos del suelo.

Tanto para la actividad de seguimiento del cambio, como para la generación de modelos de apoyo a la planificación, el desarrollo cada vez de mejor información sobre la distribución de los usos y cobertura de suelo en el globo, continuará el proceso de evolución tecno-científica que ha seguido hasta ahora. En adición, procesos de interpretación humana, como los llevados a cabo en este trabajo para identificar usos de suelo urbano y almacenarlos en una base de datos, continúan aún siendo necesarios a la hora de realizar clasificaciones sobre los usos de suelo urbano, en la medida en que los algoritmos no sean capaces de realizar clasificaciones automáticas de detalle sobre los diferentes usos del suelo urbano.

En Europa, bases de datos como CORINE Land Cover tienen gran valor para el desempeño de estas mencionadas capacidades, sin embargo, tal y como se ha plasmado en este trabajo, determinados tipos de aproximaciones, requieren escalas de mayor de detalle, como lo demuestran el surgimiento de nuevas fuentes de datos de gran precisión. Un buen ejemplo de estas lo representa 'Urban Atlas', que si bien sólo se desarrolla actualmente para las grandes áreas urbanas europeas, y sólo para el año 2009, es muy probable que continúe su desarrollo con la intención de mejorar la información en este aspecto. En este aspecto ha de tenerse en cuenta el discurso de la Comisión Europea con relación a la eficiencia para la gestión de los recursos, las políticas de adaptación y mitigación del cambio climático y el desarrollo de ciudades más sostenibles. La Comisión Europea ya ha manifestado el deseo de conseguir la mínima ocupación del suelo (cerca al crecimiento cero) por usos artificiales para 2050 (European Commission, 2011).

Durante el desarrollo de MLU para la Comunidad Autónoma de Madrid se ha detallado en esta investigación su proceso de construcción, cuyos resultados servirán de criterio para el desarrollo de otros trabajos en esta dirección, sobre todo para aquellos basados en la fotointerpretación de usos de suelo urbano. Además, a través de esta geodatabase

regional se ha evaluado la capacidad de CORINE Land Cover para analizar los cambios de usos de suelo urbano revelándose pérdidas de precisión superiores al 50% de error. En este sentido, se sugiere en este trabajo la utilización de otras fuentes de mayor detalle cuando se realizan análisis dinámicos de cambio de usos de suelo urbano en escalas locales y de detalle.

¿Cuáles han sido las pautas generales de transformación de la región metropolitana de Madrid, en cuando a la ocupación por suelo urbano y su distribución, para la primera década del siglo XXI, y observadas a escala de detalle?

El desarrollo de MLU permitió observar la evolución detallada del cambio de los usos de suelo urbano entre dos periodos temporales de la primera década del siglo XXI (2000-2006, 2006-2009) en la región de Madrid (límites administrativos de la Comunidad Autónoma). El periodo 2000-2006 se aproxima al tramo final de una etapa de crecimiento urbano continuo y exacerbado experimentado por muchas áreas metropolitanas europeas, cuyos excesos, señalados ampliamente por diferentes instituciones de investigación y agencias gubernamentales, han sido ya citados en el presente trabajo. Por otro lado, el periodo 2006-2009 marca el inicio de una crisis financiera global, que se traduce, entre otras repercusiones económicas, en una ralentización generalizada del crecimiento urbano.

La región metropolitana de Madrid responde perfectamente a las mencionadas dinámicas de crecimiento durante estos periodos en términos cuantitativos. Esto se resume en altas tasas de crecimiento poblacional y ratios aún mayores de crecimiento de suelo urbano (artificial). Sin embargo, si bien en este sentido Madrid se sitúa en los primeros puestos del ranking de crecimiento de ciudades de la Unión Europea, este trabajo pone sobre todo el enfoque en el tipo de expansión urbana que se ha producido en la región metropolitana madrileña, en la distribución de los usos de suelo, la progresión espacial urbana fragmentada y en el tipo de modelo urbano que se ha acentuado durante los mencionados periodos de estudio (2000-2006, 2006-2009). En esta dirección, se señala para Madrid la consolidación de un "modelo híbrido", entre el crecimiento urbano disperso (sprawl) y el desarrollo de la ciudad compacta. Un

fenómeno que Catalán et al., . (2008) también han identificado para la región metropolitana de Barcelona.

El señalado modelo híbrido se caracteriza por un elevado desarrollo de grandes espacios periféricos residenciales de viviendas colectivas (multifamiliares), que en contraste con el desarrollo característico residencial del centro de Madrid o los desarrollos compactos y de alta densidad de los municipios metropolitanos, éste se extiende en densidades netas de población más moderadas, con menor desarrollo en altura (plantas de edificación) y con grandes espacios abiertos y extensas áreas verdes. Este modelo contrasta también con los clásicos desarrollos extensivos de unidades residenciales unifamiliares de baja densidad, que si bien se dan en Madrid, no tienen parangón con el tipo de *sprawl* de dimensiones extraordinarias descrito para, ej. muchas ciudades norteamericanas.

¿Cuáles son las reglas de transición que definen los patrones de cambio de los usos de suelo urbano de la región de Madrid reconocidas a través del desarrollo de un MDUAC?

El desarrollo de los modelos dinámicos de usos de suelo urbano en la ciudad tienen como objetivo principal capturar los patrones de cambio y las reglas que están funcionando para producir dichos patrones. Esta es la principal aportación de una de estas aplicaciones y en ello consiste su calibración y validación.

La definición de las reglas de transición que definen los patrones de cambio de usos de suelo en la región metropolitana de Madrid se encuentran contenidas en los parámetros de peso que están representando mayormente las interacciones de vecindad entre los usos de suelo. Éstas se expresan en un marco de competencia por la ocupación del espacio. El poder explicativo de los MDUAC se encuentra implícito en el funcionamiento de las simulaciones dinámicas y en los valores de los pesos, coeficientes y parámetros calculados empíricamente para la función de transición. Todos estos datos se encuentran recogidos en el Anexo I de este trabajo.

En la búsqueda de unos patrones que simulan el cambio de los usos de suelo para la región de Madrid entre 2000-2006 (periodo de calibración) y 2006-2009 (periodo de

validación), debe destacarse la dificultad para, en ocasiones, introducir reglas espacialmente homogéneas para todo el territorio. En este punto se produce aparentemente una contradicción entre la premisa de que los patrones deben funcionar de modo semejante en todas los lugares de la región de estudio y la introducción de pesos que producen efectos (crecimientos, contracciones, etc) en un área. A priori, parece que los patrones no funcionan de manera homogénea en todo territorio modelado. Esta contradicción, como se ha dicho, sucede en apariencia, ya que cuando se producen mejoras durante el proceso de calibración, se observa que el factor que estaba produciendo una *mala* calibración no era el producido por esta homogeneidad espacial de las reglas del MDUAC, sino por entradas de valor de atracción/repulsión entre usos de suelo que aún no habían sido correctamente identificadas.

Para poner un ejemplo (no real) sobre esta circunstancia anteriormente expuesta, piénsese en dos áreas que presentan desarrollos de suelo industrial, una puede ser el eje de la autovía A-2 al Noreste de la región metropolitana y otras áreas del Sur 'industrial' de Madrid como las relacionadas a la carretera A-42 hacia Toledo. Supongamos que una de estas áreas ha experimentado un enorme crecimiento industrial durante el periodo de estudio (2000-2009), en cambio la otra ha detenido la expansión de suelo industrial y se ha caracterizado por un crecimiento de los suelos residenciales. El factor de inercia para el suelo industrial está calibrado como bastante alto (muy difícil cambiar de estado industrial a otro estado), y además, existe una enorme de atracción desde el suelo industrial hacia este mismo tipo de suelo en la cercanía inmediata. Estos valores de peso en el modelo, impulsarán el crecimiento del suelo industrial en áreas en donde previamente existía este tipo de suelo. Por tanto, el crecimiento en hectáreas de suelo industrial impuestas a la aplicación para cada año, localizará probablemente estas nuevas hectáreas industriales en estas zonas. Pero como se explicaba al principio, ambas zonas (A-2, A-42) en este hipotético ejemplo no funcionan igual. Lo primero que se tiende a pensar es que la calibración de fuerzas para el suelo industrial no funciona igual en el Noroeste y el Suroeste de Madrid, contradiciendo el principio de homogeneidad de las reglas de transición para toda la región de estudio. Sin embargo, posteriores pasos empíricos, aumentaron la atracción de los usos residenciales sobre las mismos usos residenciales, además se aumentó el valor de atracción sobre los suelos en abandono más que sobre otros suelos no artificiales (cultivos, bosques...). De esta manera se

produce el hallazgo de los patrones de cambio producidos en estas zonas del Noroeste y Sur de Madrid, para los mencionados usos de suelo.

El ejemplo expuesto expresa una situación muy común que se manifiesta durante la calibración empírica del modelo, y muestra también la complejidad que es capaz de representar un MDUAC, pero que en definitiva, no puede ser explicada en términos conceptuales. El comportamiento y la explicación de la evolución de los usos de suelo en la región de Madrid, queda entonces implícita en el desarrollo esta aplicación. Su verdadera utilidad estriba entonces, en el planteamiento de escenarios futuros (cambiando las reglas y cambiando la demanda), en la relación dinámica de este modelo con otros modelos (transporte, contaminación del suelo, fragmentación de hábitats...), y en el importante ejercicio pedagógico que realiza el investigador durante el proceso de calibración y validación del mismo.

¿Qué efecto tiene el cambio de los factores de escala en un MDUAC urbano?

En esta investigación se ha evaluado un modelo local de MDUAC de uso extendido e implementado en la aplicación de software METRONAMICA, con el objetivo de comprobar la sensibilidad del modelo en cuanto a los cambios de escala-resolución. Para ello se calibró una aplicación sobre los cambios de usos de suelo de la región de Madrid a una resolución de 50m. x 50m. (tamaño de celda) para luego utilizar los mismos parámetros en dos ulteriores aplicaciones de 25m. x 25m. y de 100m. x 100m. de resolución. El experimento concluye la no dependencia del modelo del factor de escala, cuestión que supone una interesante aportación en cuanto al desarrollo de este tipo de aplicaciones. En este sentido los resultados indican que una vez validado un modelo a cierta escala-resolución, si se aplican los mismos datos de entrada y parámetros, dentro de un rango razonable de acuerdo a la región cartográfica y el fenómeno representado¹⁰, el modelo puede ser ejecutado con otra resolución, que deben esperarse valores de calibración similares a los de la aplicación original.

¹⁰ En este modelo se trabajó con la región de Madrid, y se experimentó con escalas que permitían diferenciar los usos de suelo urbanos detectados en la clasificación cartográfica. El límite del aumento de

¿Existe la posibilidad de combinar los modelos basados en autómatas celulares, con otros modelos de carácter más predictivo, como los desarrollados bajo algoritmos de redes neuronales artificiales?

En el transcurso de esta investigación, además de trabajar con MDUAC, también se desarrollaron aplicaciones dinámicas de simulación de cambio de usos de suelo basadas en redes neuronales artificiales (RNA). Estos modelos, presentados en ocasiones como herramientas de predicción, en este caso, para la localización de los cambios de usos de suelo, son, al igual que los modelos basados en autómatas celulares, prototipos capaces de identificar patrones espaciales de cambios de uso de suelo. Sin embargo, los algoritmos implementados en estas aplicaciones que calculan los pesos para las normas de transición no resultan tan accesibles para el usuario. Éste puede llegar a conocer el funcionamiento de los algoritmos de 'aprendizaje', que entrena la red neuronal, pero como en el uso de algoritmos genéticos, los ejercicios empíricos quedan casi reducidos al cambio de los datos de entrada en el modelo. En la aplicación de MDUAC utilizada en esta investigación, por el contrario, los pesos de atracción-repulsión de los usos de suelo son introducidos por el investigador, en un proceso que implica aprendizaje (entrenamiento) para la máquina, pero sobre para la persona.

Las aplicaciones de RNA se mostraron extraordinariamente útiles para señalar la aptitud de un espacio para acoger un determinado uso de suelo futuro de acuerdo a sus patrones anteriores de localización. Este hecho, fue uno de los que impulsó el interés para el trabajo con estos prototipos en esta investigación. Ya que siendo la aptitud del suelo (conjunto de variables sociales, ambientales y económicas) uno de los factores que forman parte del MDUAC evaluado en este trabajo, las aplicaciones desarrolladas sugieren una posible integración de ambos modelos MDUAC-RNA.

escala lo especifican los datos cartográficos, en este caso vendría dado por la pérdida en exceso de información. En este caso de la distribución de clases de usos de suelo urbano.

III.1.2.- Conclusión general

En este trabajo de investigación se ha querido tratar desde una perspectiva geográfica, la evaluación de un modelo dinámico de cambio de usos de suelo urbano, utilizando como excusa la observación de la evolución urbana de la región de Madrid. Tanto los modelos computacionales, como las herramientas informáticas para el tratamiento y análisis la de información geográfica, están suponiendo un importantísimo apoyo para la explicación de cualquier fenómeno espacial. Esto que en nuestros días ya comienza a ser un tópico, toma hoy mayor fuerza, de la mano del desarrollo de la ciencia de la complejidad, y de la capacidad de los ordenadores y los algoritmos para simular múltiples relaciones simples entre agentes que se distribuyen en el espacio, más sencillos (usos de suelo) o más complicados (inmobiliarias, conductores, estudiantes, constructores...), conformando dinámicas complejas. En realidad, en muchos casos, como ha dicho O'Sullivan (2004), para la Geografía Humana, todos estos nuevos argumentos de la complejidad son nuevos nombres para viejas ideas. No obstante, aún en ese caso, este trabajo trata de hacer una pequeña aportación más dentro de los esfuerzos para conectar la investigación geográfica con esta perspectiva de la complejidad a través de los MDUAC, si bien como en todos los esfuerzos de este tipo, las fuerzas se disipan en multitud de apéndices prácticos y metodológicos. En cualquier caso, todos ellos han girado en torno a las ciudades, los autómatas celulares y los sistemas complejos.

III.2.- CONCLUSIONS

A set of conclusions are showed in the next paragraphs according to the posed research questions taking as reference the suggested issues and sequence.

III.2.1.- Conclusions on research questions

Which are the elements to consider on the application of MDUAC (Cellular Automata-based Land Use Change Dynamic Model) in Mediterranean urban regions like Madrid?

The use of the MDUAC to simulate European cities' growth had an undeniable development in the last decades. They are especially oriented to find techniques that

allow planning new urban developments, and connected with the concerns on urban dispersion patterns (i.e. sprawl) mentioned by the European Environmental Agency (EEA, 2006; 2010). The development and application of MDUACs in European urban regions, like the one presented in this research, METRONAMICA/MOLAND (Lavallo et al., 2001; Lavallo et al., 2004; Petrov et al., 2009; Kim y Batty, 2011), SLEUTH (Silva y Clarke, 2002; Caglioni et al., 2006), or CLUE (Gallardo, 2014; Verburg y Overmars, 2009), clearly exemplify their appropriateness and successfulness to study and support the land use/ land cover change planning in Europe.

Essentially, the above-mentioned models share the Complexity Science approach, which is applied to the cities through cellular automata models. This implies they both use the 'spatial neighbourhood' as key factor to simulate land use changes. This factor, together with accessibility, was critical to provide a successful calibration and validation processes in the MDUAC applied to Madrid.

This is an ad-hoc experiment on the Madrid region; therefore it does not count with any kind of comparison parameters from other similar calibration experiments in the area. Still, some relevant conclusions can be extracted. The following issues need to be considered for MDUACs to be developed on Mediterranean urban regions similar to Madrid:

1) Understanding MDUAC theoretical background

The elaboration of the research background of this work has been essential for a better definition of the expectations we should have when using a MDUAC to simulate the urban transformations. In Mediterranean urban regions, like in any other regional urban environment, it is quite important to know that cellular automata-based models must be used considering cities dynamically as in the Complexity theory framework. Otherwise, working with this kind of models might produce frustration, for example if we apply a mechanistic approach to the urban evolution, or we aim to find behavioural laws, or we try to find accurate outcomes to forecast future land use locations in a probabilistic way by using any kind of uncertainty degree approach. In this sense, and based on this research experience, we should consider whether the phenomenon to be modelled comprises some property of the complex systems previous to its use.

2) The selection of the spatial resolution

A spatial resolution of 50x50 m was used on the developed application in the Madrid region, although previous tests were done with 25x25 m and 100x100 m. resolution in order to analyze the effects of the resolution variability on the model calibration rules.

With regard to computation processes, working with 50x50 m. cells allows a reasonable computation speed (CPU intel core i5), even when computing large regions (Madrid comprises eight million and a half cells). Nonetheless, for a higher agility on the calibration process, using 100x100 m. cells gives better results.

With respect to the accuracy of the outcomes, a higher resolution clearly provides more accurate representations, although it is important to distinguish between the accuracy of the land use allocation and the accuracy of the model, with the latter being the result of comparing the simulated map with maps based on actual land use data.

A spatial resolution of 200 x 200 m. or higher is required for each land use distribution snapshot in Mediterranean urban regions for intense urban dynamics (land use change in 10,000 to 15,000 ha. per year) and intermediate time periods (5 to 10 years), as demonstrated in previous research based in the CORINE Land Cover. Shorter time periods (fewer than 5 years), or with lower ratios of urban land use change (fewer than 5,000 ha/year), require resolutions of 50x50 m. The calibration process of the model becomes excessively slow for more detailed scales (i.e. 25x25 m.) for large regions (Madrid engage around 34 millions of cells) without providing significantly better results, likely due to the large size of the study area. In this sense, the use of this kind of detailed resolution can be more useful to model medium-sized cities or the urban change within a municipality.

3) Order and systematization of the calibration works

Urban developments in Europe are usually done through land use planning, i.e. a plan is accepted for a specific administrative ambit to allow the allocation of any class of land use, and for explicit zones. MDUAC transition rules 'Zoning' factor typically limits the simulated allocation possibilities of the new land uses in excess. In fact, introducing this

factor to start the calibration of a MDUAC might induce premature good but probably biased outcomes.

The MDUAC requires a certain systematized order of the calibration tasks. If the core of the transition rules (and the essence of the cellular automata) is the neighbourhood factor, this should be adjusted in the first place within the transition rules. In this way, neighbourhood dynamics between the land uses are simulated with high degree of freedom with respect to other subsequent factors, like accessibility (A) and the suitability (S), or ultimately, zoning, which, as it was mentioned before, creates important spatial restrictions.

4) Spatial singularity of the neighbourhood rules

In the search of patterns to simulate the land use change on the Madrid region between 2000-2006 (calibration period) and 2006-2009 (validation period), it must be remarked the difficulty to make some homogeneous rules for the entire region. In this point, an apparent contradiction appears due to the premise that: all the patterns should work in a similar manner in all the corners of the study region, i.e. the weight introduced to produce the neighbourhood effect on the simulated land uses does not apparently bring the same results in all the zones of the region. This contradiction occurs is in fact only apparent, since after new advances in the calibration process it is observed that the initial unexpected calibration was not made due to the spatially inhomogeneous rules, but because the weighted values (attraction/repulsion) had not been correctly identified.

Let us think of two zones where there are industrial land developments to illustrate a hypothetical (not real) case about the above-mentioned situation. One of them could be the area of the A-2 motorway in the Northeast of Madrid metropolitan region, and the other would be one of the industrial areas in the south of Madrid, like those related with the A-42 motorway towards Toledo. Let us suppose that one of these areas has experienced a huge industrial growth during the study time period (2000-2009), whereas the other already stopped the industrial land expansion and it is characterised by residential growth.

The inertia factor for industrial land was calibrated with very high values, i.e. it is quite difficult to produce a change from industrial to any other land use. Moreover, there is a huge attraction from the industrial land to itself in the immediate nearness. These specific weight values are boosting the industrial growth in areas where this land use was previously allocated. Therefore, the demand of industrial land imposed to the model tends to be more likely localized near to the existing industrial land.

As it was already explained, in this hypothetical case each area (A-2, A-42) apparently operates in a different way. The first attempt would be thinking that the calibration of the neighbourhood for the industrial land needs to be specifically set out for each case. This contradicts the homogeneity principle of the transition rules for the study region. After that, subsequent empiric implementations increased the attraction within the residential land use. In addition, the attraction values of the abandon land increased more than any other land use attracting residential land (crops, forest...). It is in this way of subsequent implementation how we finally found the right land use change patterns for both areas (Northeast and South of Madrid).

This example illustrates a very common situation that appears during the empiric calibration of the model. It also shows the complexity that a MDUAC is able to represent, which definitely cannot be explained in conceptual terms. The behaviour and explanation of the land use evolution in the Madrid region, is then implicit into the own development of this application. The real utility of this model consists on the projection of future scenarios (changing the rules, or changing the demand); its feasibility to be connected with other models (transport, soil pollution, habitat fragmentation...); and the remarkable pedagogic exercise done by the researcher during the calibration process.

How much can land use change observation improve by counting with a detailed land use database?

The MLU geodatabase building process and the comparison with CORINE Land Cover were used to create a new set of inputs that supports the idea of needing an improved land use geographic database for the urban environment. Nowadays this is, and it will likely keep being, a global concern for the development of techniques to monitor and study the growth and expansion of the cities from the land use approach.

The development of better information on the land use /land cover distribution on the globe will continue the current techno-scientific process both for land use change monitoring and for model generation for planning support. In addition, human interpretation processes, like those carried out in this work to identify urban land uses and store them into a database, are still being necessary in urban land use classification tasks, at least while the algorithms are not able to automatically classify the different urban land use types in detail.

In Europe, land use databases like CORINE Land Cover have a great value to fulfil the above-mentioned capacities. Still, as this work attempts to show, some approximations require a larger spatial resolution, as evidenced in the emerging new high accuracy data sources. The 'Urban Atlas' is a good example, which is currently developed for the largest urban areas of Europe, and only available for 2009. It is quite probable that this database continues its development to improve the land use information in the region. In this aspect, the European Commission decision in relation with resource management efficiency, the climate change adaptation and mitigation policies, and the development of more sustainable cities needs to be taken into account. The European Commission has already revealed its desire of getting the minimum land occupation (close to the zero growth) by artificial land uses in 2050 (European Commission, 2011).

The building process has been described during the MLU development for the Autonomous Community of Madrid, whose results will work as a base to develop other works in the same direction, especially those based on urban land use photo-interpretation. Furthermore, the capacity of CORINE Land Cover to analyze the urban land use change in Spain was assessed using this geodatabase (MLU). An accuracy lost over 50 per cent was revealed. In this sense, this work suggests the use of more accurate sources when analysing land use change dynamics in Europe in local scales (i.e. cities, municipalities).

What urban land use occupation and distribution general transformation patterns have happened in the metropolitan region of Madrid, during the first decade of the XXI century, when is observed at detailed scale?

The MLU development permitted the exploration of the urban land use evolution at a high detail in the Madrid region (Madrid Autonomous Community administrative boundaries), and during the first decade of the XXI century (2000-2006, 2006-2009). The period 2000-2006 can be identified as the final stage of a longer period of continuous and exacerbated urban growth. This expansion was also experienced by other European metropolitan regions, whose excesses were pointed out by different research institutions and governmental agencies, which have also been remarked in this research.

The metropolitan region of Madrid perfectly matches with the indicated growth dynamics during these periods in quantitative terms. In summary, this means high population growth ratios, and even higher ratios of urban land growth (in the European context). In spite of this growth, which puts Madrid in the first posts of the European cities ranking growth, this work focussed principally in the type of urban expansion, the urban land use distribution, the scattered urban development and the type of implemented urban model, which was accentuated during the study periods (2000-2006, 2006-2009). In that way, the strengthen of a 'hybrid model', or something between the disperse urban growth (sprawl) and the compact urban development was unveiled in Madrid. A phenomenon that Catalán et al., (2008) had previously identified in the metropolitan region of Barcelona.

This hybrid model is characterised by high development of large and peripheral residential areas of collective housing (multi-storey houses) with moderate population densities, differing from the typical residential developments in Madrid core centre, or the compact and high density developments of the metropolitan municipalities (suburban spaces). This urban model also contrasts with the classic extensive urban residential low density developments, that while appearing too in Madrid, it is to a much lower extent than the extraordinary sprawl described for many North American cities like Los Angeles.

Which are the transition rules identified through a MDUAC that are defining urban land use change patterns in the Madrid region?

The main objective of urban land use models is to capture the change patterns, and the rules underneath them. This is the principal output of this kind of applications and it is in what consists its calibration and validation.

The identification of the transition rules that are defining the land use change patterns in the metropolitan region of Madrid are inherent to the weighted parameters that are mostly representing the neighbourhood interactions among the land uses. These rules are articulated on a competition framework of land occupation. The explanatory strength of the MDUAC is implicit in the dynamic simulation, which is driven by the values of the neighbourhood weights, and the coefficients and parameters empirically found for the transition function. All this information is collected and showed in the Annex I of this work.

What is the effect of changing the scale factors on an urban MDUAC?

This research assessed a local MDUAC implemented in METRONAMICA, a widely tested software. The main objective was to test the sensitivity of the model to resolution changes. In order to carry out such operation, an application of 50 m. x 50 m. was calibrated over Madrid land use changes, and then the same parameters were estimated for 25 m. x 25 m. and 100 m. x 100 m. resolution datasets. The experiment concluded that the model is not dependent on the scale factor (in terms of resolution). This statement comprises an interesting contribution to the development of this kind of applications. In this sense, the results show that, once a model at a specific spatial resolution is validated, we can expect similar results when applying the same inputs, parameters (within a reasonable range size according to the mapped region) and calibration values to run another model.

Can cellular automata-based models be combined with predictive models, like those developed under the use of algorithms based on artificial neural networks?

In addition to the MDUAC work, during this research dynamic applications based on artificial neural networks (ANN) were developed to simulate land use changes. These models are often presented as predicting tools. In this case, they were used to allocate land use changes. Like the models based on cellular automata, they are prototypes able

to identify spatial land use change patterns. While the algorithms implemented on these applications compute the weights, they are not too accessible for the user. The user can get to know how the learning algorithms work to train the neural network, although, like when using genetic algorithms, the empirical exercises are almost reduced to changing the inputs of the model. On the contrary, the MDUAC used in this research needs to be empirically calibrated by the researcher through a process that implies training for the machine and also for the user.

The ANN applications are of great usefulness to estimate the suitability of a location to host a specific future land use according its last allocation pattern, which enhanced the interest of using this prototype in this research. Indeed, land suitability (the set of social, environmental and economic variables) is one of the factors within the MDUAC that have been assessed in this work, which evidences the opportunity of a further integration of both models, MDUAC-ANN.

III.2.2.- General conclusion

This research work deals with the evaluation of a dynamic model of urban land use change from a geographic perspective by using the evolution of the Madrid region as an example.

Both the computing models and the management and geographic information analysis software are a remarkable support for explaining any spatial phenomena. This, that nowadays starts to seem a topic, becomes more solid today, together with the development of the complexity science, the computer capacity, and the algorithms to simulate multiple simple relationships among simple (i.e. land uses) or sophisticated (e.g. real states, drivers, students, builders...) agents distributed over the space conforming complex urban dynamics.

In many cases, as O'sullivan (2004) said, in Human Geography, all these new complexity arguments are new names for old thoughts. Still, even in that case, this work attempts to make a little contribution to the efforts to connect the geographic research with this new complex perspective through the MDUAC, even though, as in other similar efforts, its strength is dissipated in multiple practical and methodological

appendixes. Anyway, all of them deal with the cities, the cellular automata and the complex systems.

III.3.- LIMITACIONES DEL MODELO Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.

III.3.1.- Limitaciones del modelo

En cuanto a las limitaciones de los modelos dinámicos urbanos de cambio de usos de suelo basados en autómatas celulares (MDUAC), parece necesario diferenciar entre aquellos aspectos que tienen que ver con su desarrollo, exploración y evaluación; y aquellos que se relacionan con su aplicación. Para el primer caso, los autómatas celulares continúan su desarrollo aplicado al estudio geográfico del crecimiento de la ciudad basado en sistemas complejos, si bien, la tendencia es la introducción de una mayor 'complejidad' al autómata, a través de, por ejemplo, los denominados agentes. En este sentido, si consideramos a los modelos basados en agentes como un desarrollo de los autómatas celulares, donde se incorporan diferentes actores que influyen en las localizaciones del suelo, puede afirmarse que este tipo de modelos aún se encuentra lejos de hallar sus límites de desarrollo. Además, y este trabajo es un claro ejemplo de ello, los autómatas celulares, como herramienta de simulación de usos de suelo, requieren continuar su exploración y evaluación en base a contribuir con el conocimiento de sus múltiples dimensiones a fin de facilitar su aplicación en tareas de planificación y desarrollo de las ciudades.

Las limitaciones del modelo relacionadas con su aplicación, no son más que aquellas que podemos encontrar en el desarrollo de cualquier otro modelo que represente el crecimiento urbano, si bien, éste se encuentra entre aquellos que son capaces de simular el comportamiento no lineal, aleatorio y dinámico de los usos de suelo urbano en función del tiempo. Además, el MDUAC puede ser validado a través de estadísticas de comparación de matrices y diversos parámetros basados en métricas espaciales, lo cual le confiere consistencia científica en términos probatorios. De esta manera, incluso no contando con un periodo temporal de datos existente (un mapa de usos de suelo conocido, por ejemplo para el futuro año 2025), las simulaciones pueden ser

computadas a través de las mencionadas estadísticas y métricas espaciales con el fin de comprobar su ajuste.

En cuanto a la calidad predictiva del modelo, los valores de calibración y validación del mismo dan crédito de su nivel de predicción, no obstante, es importante hacer aquí una puntualización respecto a su utilidad como herramienta de simulación de escenarios futuros, útiles para tareas de planificación de usos de suelo. De este modo, debe tenerse en cuenta, por obvio que resulte, que un MDUAC no simula la dinámica real de un fenómeno, sino que está simulando el comportamiento dinámico de otro modelo, es decir, la abstracción de una distribución de usos de suelo, representados por una matriz de celdas con estados discretos (raster). Dicho esto, de manera lógica, es cierto que aumentando la exactitud y la precisión de los *inputs* del modelo (usos de suelo, accesibilidad, aptitud...), las simulaciones del modelo pueden mejorar su solidez y confianza, sin embargo, no debe esperarse certidumbre total en las localizaciones futuras simuladas por un MDUAC, lo que se aclara a continuación.

La utilidad de un modelo, en este caso de un MDUAC, no sólo estriba en su capacidad para predecir procesos, y menos cuando se trata precisamente de simular la no linealidad y aleatoriedad que presenta el crecimiento espacial de una ciudad. Por el contrario, el MDUAC tiene, sobre todo, la capacidad de mostrarnos la dinámica general de cambio de usos del suelo y sus pautas de localización con relativa certeza espacial, demostrada a través de las mencionadas técnicas de validación. De esta forma, un ejercicio de simulación desarrollado por un MDUAC para plantear un escenario futuro de crecimiento urbano, debería servirnos para apoyar el cálculo de efectos y procesos producidos por ese tipo de crecimiento (contaminación del suelo, demanda de transporte, ocupación de suelo agrícola, etc), sin embargo, no debe esperarse gran certidumbre en términos de predicción espacial estricta. Lo cual, además sería ciertamente contradictorio, atendiendo al fundamento que presentan los sistemas complejos considerados, en base a los que el MDUAC simula el crecimiento urbano. Por tanto, si bien este aspecto se ha querido incluir dentro de este apartado de limitaciones, podría entenderse también como un requerimiento insalvable a la hora de modelar el crecimiento de una ciudad a través de un método que pretende simular su comportamiento complejo.

III.3.2.- Futuras líneas de investigación

El desarrollo de esta investigación deja tras de sí la elaboración de una serie de inputs que pueden ser empleados a posteriori en futuros trabajos relacionados el estudio de las transformaciones urbanas de la Comunidad de Madrid. De este modo, la elaboración de una base de datos de usos de suelo a escala de detalle enriquecida, además asociada en su formato vectorial a una fuente estadística, como lo son las secciones censales, permitirá el desarrollo posterior de multitud de análisis dinámicos o estáticos, sobre las características geográficas, ambientales y socio-económicas de esta región metropolitana.

Además, un modelo urbano dinámico de cambio de usos de suelo ha sido calibrado y validado para una región metropolitana europea Mediterránea, cuyos pesos introducidos empíricamente y a través de un largo proceso, se encuentran ahora disponibles para que una investigación, quizá de carácter más aplicado, no tenga que partir desde cero adquiriendo los *outputs* proporcionados. En este caso el modelo puede ser aplicado a ciudades de características similares a la Comunidad de Madrid. Estudios ambientales de fragmentación de hábitats, contaminación ambiental, trabajos sobre planificación de crecimiento urbano o cualquier otro análisis que se pueda derivar de la distribución de los usos de suelo urbano, tiene la posibilidad de utilizar este modelo para generar cualquier tipo de escenario futuro, cambiando los patrones y cambiando la demanda de usos de suelo.

Dentro de los estudios mencionados, se hace especial referencia a la posible combinación del modelo dinámico de cambio de usos de suelo con modelos dinámicos de demanda de transporte, para lo cual, existen incluso varios tipos de software conocidos como 'LUTI' (Land Use and Transport Interaction) que ya implementan esta posibilidad. De hecho, METRONAMICA, también desarrolla su versión en esta dirección, con lo que un futuro trabajo podría avanzar sobre los resultados obtenidos en esta investigación.

En la aplicación desarrollada en este trabajo, basada en autómatas celulares, también se pueden incorporar modelos a escala regional y global para realizar cálculos no lineales de la evolución de la demanda de usos de suelo. Esto no sólo incorporaría mejoras a la

aplicación desarrollada en este trabajo, sino que introduciría mejor la complejidad que trata de reflejar la interacción de los autómatas, ya que podría interpretar más adecuadamente los efectos de las perturbaciones externas e internas en el sistema.

Los trabajos sobre el efecto de la escala y resolución en los modelos dinámicos urbanos de usos de suelo basados en autómatas celulares, concluyeron que futuros trabajos pueden orientarse a explorar el efecto del cambio del parámetro aleatorio incluido en la ecuación para el cálculo del potencial de transición, ya que en este trabajo el factor 'random' se mantuvo constante en los experimentos realizados.

En esta investigación también se ha evaluado el uso de modelos de carácter más predictivo, como lo son aquellos basados en redes neuronales artificiales. El trabajo concluye que los productos generados, que son en esencia mapas de potencial de transición de cambios de usos de suelo, pueden servir para combinarse con los modelos basados en autómatas celulares, sobre todo en los cálculos de aptitud. En este sentido, futuros trabajos podrían seguir avanzando con esta combinación de las mejores cualidades de ambos modelos, y por supuesto hacerlo de manera dinámica.

Por último, en este trabajo se ha incorporado el fondo teórico que envuelve a los modelos dinámicos geográficos basados en autómatas celulares. Se trata de las teorías de la complejidad y de los sistemas complejos. Existen importantes líneas dentro de las Ciencias Sociales y de la Geografía en particular que están completando el marco de desarrollo de estos conceptos relativamente nuevos, que requieren de una mayor profundidad y estudio. De esta manera, también se incentiva el desarrollo líneas futuras de investigación que continúen conformando la ciencia de los sistemas complejos aplicada a ámbitos relacionados con el desarrollo humano sostenible y a su capacidad adaptativa o resiliencia. Sobre todo para contribuir a generar instrumentos y herramientas de aplicación local que permitan a la sociedad superar retos globales como la adaptación al cambio climático.

III.4.- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Achard, F., Eva, H. D., Mayaux, P., Stibig, H. J., and Belward, A. (2004). Improved estimates of net carbon emissions from land cover change in the tropics for the 1990s. *Global Biogeochemical Cycles*, 18(2).

Aguilera Benavente, F. (2006) Predicción del crecimiento urbano mediante sistemas de información geográfica y modelos basados en autómatas celulares. *Geofocus*, 6, 81-112.

Aguilera Benavente, F., Valenzuela Montes, L.M. and Bosque Sendra, J. (2010) Simulación de escenarios futuros en la aglomeración urbana de Granada a través de modelos basados en Autómatas Celulares. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 54, pp. 271-300.

Améndola, G. (2000). *La ciudad postmoderna*. Madrid: Celeste Ediciones.

Arroyo, M. (2001). La contra urbanización: un debate metodológico y conceptual sobre la dinámica de las áreas metropolitanas. *Papeles de población*, 7(30), 93-129.

Artenetxe, J. L. (1993). El hecho metropolitano: claves para una reflexión. *Boletín de Estudios Económicos*, 48(148).

Ascher, F. (1995). *Metapolis ou l'avenir des villes*. París: Odile Jacob.

Arthur, W. B. (1994). *Increasing returns and path dependence in the economy*. University of Michigan Press.

Badoe, D. A., y Miller, E. J. (2000). Transportation–land-use interaction: empirical findings in North America, and their implications for modeling. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 5(4), 235-263.

Barredo, J. I., and Gómez, M. D. (2008). Towards a set of IPCC SRES urban land use scenarios: modelling urban land use in the Madrid region. In *Modelling Environmental Dynamics* (pp. 363-385). Springer Berlin Heidelberg.

Batty, M., y Longley, P. A. (1994). *Fractal cities: a geometry of form and function*. Academic Press.

Batty, M., y Xie, Y. (1994). From cells to cities. *Environment and planning B*, 21, s31.

Batty, M., Xie, Y., y Sun, Z. (1999). Modeling urban dynamics through GIS-based cellular automata. *Computers, environment and urban systems*, 23(3), 205-233.

Batty, M. (2007). *Cities and complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. The MIT press.

Barnes, T. J. (2001). Retheorizing economic geography: from the quantitative revolution to the “cultural turn”. *Annals of the Association of American Geographers*, 91(3), 546-565.

Barredo, J. I., L. Demicheli, C. Lavallo, M. Kasanko, y N. McCormick. (2004). Modelling future urban scenarios in developing countries: an application case study in Lagos, Nigeria. *Environment and Planning B*, 31:65-84.

Benguigui, L., Czamanski, D., Marinov, M., y Portugali, Y. (2000). When and where is a city fractal?. *Environment and Planning B*, 27(4), 507-520.

Berry, B. J. (1980). Urbanization and counterurbanization in the United States. *The Annals of the American Academy of Political and Social Science*, 451(1), 13-20.

Bosque Sendra, J., Rodríguez Rodríguez, V., Preciado, S., y Miguel, J. (1983). La geografía cuantitativa en la universidad y la investigación española. *GEO-CRÍTICA: Cuadernos críticos de geografía humana*, 8(44).

Caglioni, M., Pelizzoni, M., & Rabino, G. A. (2006). Urban sprawl: A case study for project gigalopolis using SLEUTH model. In *Cellular Automata* (pp. 436-445). Springer Berlin Heidelberg.

Caraballo, T., Kloeden, P. E., and Langa, J. A. (2003). Atractores globales para sistemas diferenciales no autónomos. *CUBO: Matemática Educacional*, 5, 2.

Castells, M. (1985). High technology, economic restructuring, and the urban-regional process in the United States. *High technology, space, and society*, 28, 11-40.

Castells, M. (1997). *La era de la información. Economía, sociedad y cultura. Volumen I: La sociedad red*. Madrid: Alianza Editorial.

Castellani, B., y Hafferty, F. W. (2009). *Sociology and complexity science: a new field of inquiry*. Springer.

Clarke, K. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical. *Environment and Planning B*, 24: 247-261.

Cecchini, A. (1996) Urban modeling by means of cellular automata: generalized urban automata with the help on-line (AUGH) model. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 23: 721-732.

Chingcuanco, F., and Miller, E. J. (2012). A microsimulation model of urban energy use: Modelling residential space heating demand in ILUTE. *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(2), 186-194.

Cilliers, P. (1998). *Complexity and postmodernism: Understanding complex systems*. Psychology Press.

Clarke, K. (1997). A self-modifying cellular automaton model of historical. *Environment and Planning B*, 24, 247-261.

Clarke, K. C., y Gaydos, L. J. (1998). Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(7), 699-714.

Clarke, K. C., Gazulis, N., Dietzel, C., y Goldstein, N. C. (2007). A decade of SLEUTHing: lessons learned from applications of a cellular automaton land use change model. *Classics in IJGIS: twenty years of the international journal of geographical information science and systems*, 413-427.

Clavero, I., Santos, M., Navarro, R., Guerrero, J. J., Cáceres, F., y Moreira, J. M. (2010). Implementación de un sistema de escenarios futuros sobre el mapa de usos de suelo de Andalucía. *La información geográfica al servicio de los ciudadanos [Recurso electrónico]: de lo global a lo local* (pp. 759-776). Secretariado de Publicaciones.

C.M. 2009. Evolución de la Evolución del Suelo en la Comunidad de Madrid, 1956-2005. Informe de la Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio.

Couclelis, H. (1985). Cellular worlds: a framework for modeling micro-macro dynamics. *Environment and planning A*, 17(5), 585-596.

Couclelis, H. (1988). Of mice and men: what rodent populations can teach us about complex spatial dynamics. *Environment and Planning A*, 20(1), 99-109.

Couclelis, H. (1989). Macrostructure and microbehaviour in a metropolitan area, *Environment and Planning B: Planning and Design*, 16: 141-154.

Christaller, W., 1933, *Die zentralen orte in suddeutschland*, English translation by C.W. Baskin, 1966, *Central places in southern Germany* (Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ).

Dávila, A. (2005). Un barrio para el mercado: latinidad comercial en el East Harlem de Nueva York. *Ciudades translocales: espacios, flujo, representación: perspectivas desde las Américas*.

Dematteis, G. (1998). *Suburbanización y periurbanización. Ciudades anglosajonas y ciudades latinas*. En F. Monclús (Ed.), *La ciudad dispersa*. Barcelona: Centre de Cultura Contemporània.

Dennis, K., y Urry, J. (2013). *After the car*. John Wiley y Sons.

Di Paolo, S., Giuliarelli, D., Ferrari, B., Barbati, A., y Corona, P. (2013). Support of multispectral very high resolution remotely sensed imagery for old-growth beech forest detection. *Italian Journal of Forest and Mountain Environments*, 65(5), 519-527.

Díaz-Pacheco, J., y García-Palomares, J. C. (2014). A highly detailed land-use vector map for Madrid region based on photo-interpretation. *Journal of Maps*, 10(3), 424-433.

Díaz-Pacheco y García-Palomares, (2014). Urban sprawl in the Mediterranean urban regions in Europe, and the crisis effect on the urban land development: Madrid as study case. *Urban Studies Research*. In press.

Díaz-Pacheco, J., y Gutiérrez, J. (2013). Exploring the limitations of CORINE Land Cover for monitoring urban land-use dynamics in metropolitan areas. *Journal of Land Use Science*, 9(3), 1-17.

Díaz-Pacheco, J. y Hewitt, R. (2010). El territorio como bien de consumo: las grandes superficies comerciales en el contexto metropolitano y su implicación para el desarrollo urbano sostenible. En *Ciudad, territorio y Paisaje: Reflexiones para un debate multidisciplinar*.

Engelen, G., White, R., Uljee, I., y Drazan, P. (1995). Using cellular automata for integrated modelling of socio-environmental systems. *Environmental monitoring and Assessment*, 34(2), 203-214.

Engelen, G., Lavalle, C., Barredo, J. I., Van der Meulen, M., y White, R. (2007). The MOLAND modelling framework for urban and regional land-use dynamics. *Modelling land-use change* (pp. 297-320). Springer Netherlands.

Escudero, L. (2008). *Los Centros Comerciales, Espacios Postmodernos de Ocio y Consumo*. Cuenca: Universidad de Castilla-La Mancha.

European Commission (2011). *Roadmap to a Resource efficient Europe. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European economic and social committee and the committee of the regions*, Brussels, 26 pp.

Ewing, R. (1994). Causes, characteristics, and effects of sprawl: a literature review. *Environmental and Urban Issues* 21(2), 1-15.

Ewing, R. (1997). Is Los Angeles-style sprawl desirable?. *Journal of the American Planning Association* 63(1): 107-126.

Fernández-Galiano, L.F. (2006) Paisajes españoles. *El País* 22-04-06 (Newspaper report).

Foley, J. A., DeFries, R., Asner, G. P., Barford, C., Bonan, G., Carpenter, S. R., ... y Snyder, P. K. (2005). *Global consequences of land use. science*, 309(5734), 570-574.

Frankhauser, P. (1991). *Aspects fractals des structures urbaines Espace Géographique*, 1 pp. 45–69.

Gallardo, A. (2006). Geostatística. *Revista ecosistemas*, 15(3).

Gallardo Beltrán, M. (2014). *Cambios de usos del suelo y simulación de escenarios en la Comunidad de Madrid* (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).

Gallardo, M., y Martínez-Vega, J. (2012). Cambios de usos del suelo en la Comunidad de Madrid: analizando el pasado y simulando el futuro. *Tecnologías de la Información Geográfica en el contexto del Cambio Global*. Madrid, CSIC-AGE, 305-314.

García-Palomares, J. C. 2007. *Movilidad Laboral en la Comunidad de Madrid*. (Doctoral dissertation, Universidad Complutense de Madrid).

García-Palomares, J. C. (2010). Urban sprawl and travel to work: the case of the metropolitan area of Madrid. *Journal of Transport Geography*, 18, 197-213

García Palomares, J.C. y Gutiérrez Puebla, J. (2007). La ciudad dispersa: cambios recientes en los espacios residenciales de la Comunidad de Madrid. *Anales de geografía de la Universidad Complutense* (Vol. 27, N°. 1, pp. 45-67).

Garreau, J. (1992). *Edge city: life in the new frontier*. Nueva York: Doubleday.

Geerken, T. (2007). Madrid High Occupancy Vehicle (HOV) Lanes. 4/6/2007, 327-334.

Geurs, K., Zondag, B., De Jong, G., y de Bok, M. (2010). Accessibility appraisal of land-use/transport policy strategies: More than just adding up travel-time savings. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 15(7), 382-393.

Glouberman, S. y Zimmerman, B. (2004). Complicated and complex systems: What would successful reform of Medicare look like. *Changing Health Care in Canada*. Toronto. *University of Toronto Press*, 21-53.

Gober, P., Wentz, E. A., Lant, T., Tschudi, M. K., y Kirkwood, C. W. (2011). WaterSim: a simulation model for urban water planning in Phoenix, Arizona, USA. *Environment and Planning-Part B*, 38(2), 197.

Gutiérrez Puebla, J. 2003. *Nuevas periferias metropolitanas. Transformaciones territoriales y cambios en la movilidad: el caso de Madrid* (Trabajo de habilitación para Cátedra).

Guzman, L. A., de la Hoz, D., y Monzón, A. (2014). Optimal and Long-Term Dynamic Transport Policy Design: Seeking Maximum Social Welfare through a Pricing Scheme. *International Journal of Sustainable Transportation*, 8(4), 297-316.

Hernández-Jiménez, V., Ocón, B., Encinas, M. A., Pereira, D., y Winder, N. (2009). Planificación territorial participativa en el entorno de las grandes ciudades. Madrid y sus relaciones urbano-rurales. *Proyectos UE*, TIGRESS e ISBP (14).

Itami, R.M. (1994) Simulating spatial dynamics: cellular automata theory, *Landscape and Urban Planning*, 30: 27-47.

Katoshevski-Cavari, R. (2007). *A multi-agent planning support system for assessing externalities of urban form scenarios: development and application in an Israeli case study* (Doctoral dissertation).

Kim, D., & Batty, M. (2011). Calibrating Cellular Automata Models for Simulating Urban Growth: Comparative Analysis of SLEUTH and Metronamica. *Centre for Advanced Spatial Analysis, Paper*, 176.

Krugman, P. (1991a). Cities in space: three simple models. *Journal of Political Economy*, 3607. National Bureau of Economics Research.

Krugman, P. (1991b). History and industry location: the case of the manufacturing belt. *American Economic Review*, 81(2), 80-83.

Ladyman, J., Lambert, J., y Wiesner, K. (2013). What is a complex system?, *European Journal for Philosophy of Science*, 3(1), 33-67.

Lagarias, A. (2012). Urban sprawl simulation linking macro-scale processes to micro-dynamics through cellular automata, an application in Thessaloniki, Greece. *Applied Geography*, 34, 146-160.

Lavalle, C., Demicheli, L., Turchini, M., Casals-Carrasco, P., & Niederhuber, M. (2001). Monitoring megacities: the MURBANDY/MOLAND approach. *Development in Practice*, 11(2-3), 350-357.

Lavalle, C., Barredo, J. I., McCormick, N., Engelen, G., White, R., & Uljee, I. (2004). The MOLAND model for urban and regional growth forecast. *A tool for the definition of sustainable development paths. European Commission, DG-Joint Research Centre, Ispra, Italy, EUR, 21480.*

Le Corbusier. (1942). Principios de Urbanismo : (La Carta de Atenas). Barcelona: Planeta-Agostini, D.L. (1986).

Levin, S. A. (1998). Ecosystems and the biosphere as complex adaptive systems. *Ecosystems*, 1(5), 431-436.

Li, R., y Merchant, J. W. (2013). Modeling vulnerability of groundwater to pollution under future scenarios of climate change and biofuels-related land use change: A case study in North Dakota, USA. *Science of the Total Environment*, 447, 32-45.

López de Lucio, R. 2003. Transformaciones territoriales recientes en la Comunidad Autónoma de Madrid. *Urban* 8, 124-161

López de Lucio, R. (2011). Morfología y características de las nuevas periferias. Nueve paisajes residenciales en la región urbana de Madrid. *Urban*, (9), 56-80.

Loveland, T., Reed, C., Brown, J., Ohlen, D., Zhu, Z., Yang, L., y Merchant, J. (2010). Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 1303–1330.

Lösch, A. (1940): *The Economics Location* (English translation 1954), New Haven: Yale University Press.

Martinuzzi, S., Gould, W. A. y Ramos González, O. M. (2007). Land development, land use, and urban sprawl in Puerto Rico integrating remote sensing and population census data. *Landscape and Urban Planning* 79, 288-297.

Mitchell, M. (2009). *Complexity: A guided tour*. Oxford University Press.

Ménard, A., y Marceau, D. J. (2005). Exploration of spatial scale sensitivity in geographic cellular automata. *Environment and Planning B*, 32(5), 693-714.

Méndez, R. (2001). Transformaciones económicas y reorganización territorial en la región metropolitana de Madrid. *EURE (Santiago)*, 27(80), 141-161.

Méndez, R. (2007). El territorio de las nuevas economías metropolitanas. *Eure (Santiago)*, 33(100), 51-67.

Morin, E., & Le Moigne, J. L. (1999). *L'intelligence de la complexité*. Editions L'Harmattan.

Munoz, F. (2003). Lock living: urban sprawl in Mediterranean cities. *Cities*, 20(6), 381-385.

Nel.lo, O. (1998). Los confines de la ciudad sin confines. Estructura urbana y límites administrativos en la ciudad difusa. En J. Monclús (Ed.). *La ciudad dispersa. Suburbanización y nuevas periferias* (pp. 35-57). Barcelona: Centre de Cultura Contemporània.

OSE, (2006). *Informe anual sobre la sostenibilidad en España*. MAGRAMA.

O'Sullivan, D. (2004). Complexity science and human geography. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 29(3), 282-295.

Papini, L., y Rabino, G. A. (1997). Urban cellular automata: An evolutionary prototype. *ACRI'96* (pp. 147-157). Springer London.

Petrov, L. O., Lavalle, C., & Kasanko, M. (2009). Urban land use scenarios for a tourist region in Europe: Applying the MOLAND model to Algarve, Portugal. *Landscape and Urban Planning*, 92(1), 10-23.

Phipps, M. (1989). Dynamical behavior of cellular automata under the constraint of neighborhood coherence. *Geographical analysis*, 21(3), 197-215.

Phipps, M. J. (1992). From local to global: the lesson of cellular automata. In Individual-based models and approaches in ecology, *Springer US* (pp. 165-187).

Plata Rocha, Wenseslao; Gómez Delgado, Montserrat y Bosque Sendra, Joaquín (2008). Análisis de factores explicativos del crecimiento urbano en la comunidad de Madrid a través de métodos estadísticos y SIG. En: Hernández, L. y Parreño, J. M. (Eds.), *Tecnologías de la Información Geográfica para el Desarrollo Territorial*. Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la ULPGC. Las Palmas de Gran Canaria. Pp. 121-134.

Portugali, J. (2011). *Complexity, cognition and the city*. Springer.

Rauste, Y., Herland, E., Frelander, H., Soini, K., Kuoremaki, T., y Ruokari, A. (1997). Satellite-based forest fire detection for fire control in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing*, 18(12), 2641-2656.

RIKS BV, 2005. RIKS BV. Metronamica — A Dynamic Spatial Land Use Model. RIKS, Maastricht, The Netherlands (2005).

Santos, M. (1996). *Metamorfosis del espacio habitado*, 118 p. Barcelona: Oikos-Tau.

Santos, M., Silveira, M. L., Méndez, R., y López, R. M. (2000). *La naturaleza del espacio: técnica y tiempo, razón y emoción*. Barcelona: Ariel.

Sassen, S. (1998). Ciudades en la economía global: enfoques teóricos y metodológicos. *EURE (Santiago)*, 24(71), 5-25.

Sassen, S. (2003). Localizando ciudades en circuitos globales. *EURE*, 29, 88, 5-27.

Sassen, S. (2007). El reposicionamiento de las ciudades y regiones urbanas en una economía global: ampliando las opciones de políticas y gobernanza. *EURE (Santiago)*, 33(100), 9-34.

Schnitter, P. (2007). Sert y Wiener en Colombia. La vivienda social en la aplicación del urbanismo moderno. *Scripta Nova. Revista electrónica de geografía y ciencias sociales*, 7.

Silva, E. A., y Clarke, K. C. (2002). Calibration of the SLEUTH urban growth model for Lisbon and Porto, Portugal. *Computers, Environment and Urban Systems*, 26(6), 525-552.

Soja, E. (2000). *Postmetropolis*. Oxford: Blackwell.

Solís, E. (2008). El horizonte urbano madrileño: más allá de la región político-administrativa; The Madrilanian Urban Horizont: Beyond the Administrative Region. *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 28, 133-162.

Srivastava, P. K., Singh, S., Gupta, M., Thakur, J. K., y Mukherjee, S. (2012). Modeling impact of land use change trajectories on groundwater quality using remote sensing and GIS. *Environ Eng Manage J*. 12 (Nº 12), 2343-2355.

Taleb, N. N. (2010). *The Black Swan: The Impact of the Highly Improbable Fragility*. Random House LLC.

Tejera-Cruz, A., Bergasa López, O., y García-Weil, L. (2002). Variabilidad del nivel del mar a partir de datos del altímetro del satélite ERS-2 al sur del Archipiélago Canario en 1998. *Revista de teledetección, Madrid, Asociación Española de Teledetección*, 17, p. 71-75

Theobald, D. M., Crooks, K. R., y Norman, J. B. (2011). Assessing effects of land use on landscape connectivity: loss and fragmentation of western US forests. *Ecological Applications*, 21(7), 2445-2458.

Tobler, W. R. (1970). A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography*, 234-240.

Tobler, W. R. (1979). *Cellular geography. In Philosophy in geography* (pp. 379-386). Springer Netherlands.

Torrens, P. M., y O'Sullivan, D. (2001). Cellular automata and urban simulation: where do we go from here?. *Environment and Planning B*, 28(2), 163-168.

Turner, B. (2001). Land-use and land-cover change: Advances in 1.5 decades of sustained international research. *GAIA*, 10, 269-272.

Ulam, S. (1952, April). Random processes and transformations. *Proceedings of the International Congress on Mathematics* (Vol. 2, pp. 264-275). Public School Publishing.

USGS and University of Santa Barbara , 1996. SLEUTH — A Simulation Modeling of Urban Growth. U.S. Geological Survey. Ver en URL: <http://www.usgs.gov/index.html>.

Verburg, P. H., & Overmars, K. P. (2009). Combining top-down and bottom-up dynamics in land use modeling: exploring the future of abandoned farmlands in Europe with the Dyna-CLUE model. *Landscape ecology*, 24(9), 1167-1181.

Von Neumann, J., y Burks, A. W. (1949). *Theory of self-reproducing automata*, 1966. *Urbana*, 48.

Von Thünen, JR. (1826): *The Isolated State* (English edition 1966), Oxford: Pergamon.

Wagner, D. F. (1997). Cellular automata and geographic information systems. *Environment and planning B*, 24, 219-234.

Wang, R., Henderson, S. B., Sbihi, H., Allen, R. W., y Brauer, M. (2013). Temporal stability of land use regression models for traffic-related air pollution. *Atmospheric Environment*, 64, 312-319.

Weber, A. (1909): *The Location of Industries* (English edition 1929), Chicago: University of Chicago Press.

White, R. and G. Engelen (1993) Cellular automata and fractal form: a cellular modeling approach to the evolution of urban land-use patterns, *Environment and Planning A*, 25: 1175-1199.

White, R., Engelen, G. and I. Uljee (1997) The use of constrained cellular automata for high-resolution modeling of urban land- use dynamics, *Environment and Planning B*, 24: 323-343.

White, R., Engelen, G., Uljee, I., Lavallo, C., y Ehrlich, D. (2000). Developing an urban land use simulator for European cities. *Proceedings of the Fifth EC GIS Workshop: GIS of Tomorrow*. European Commission Joint Research Centre: S (pp. 179-190).

White, R., Engelen, G. and Uljee, I. *Modelling Cities and Regions as Complex Systems: From Theory to Planning Applications*. Cambridge, MA: MIT Press. In press.

Wolfram, S. (1984). Cellular automata as models of complexity. *Nature*, 311(5985), 419-424.













Wu, F. and C.J. Webster (1998) Simulation of land development through the integration of cellular automata and multicriteria evaluation. *Environment and Planning B*, 2: 103-126.

Wu, F. (1998). SimLand: a prototype to simulate land conversion through the integrated GIS and CA with AHP-derived transition rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 12(1), 63-82.

Zhongwei, S. 2003. *Simulating Urban Growth Using Cellular Automata*. Ph.D. dissertation, ITC.

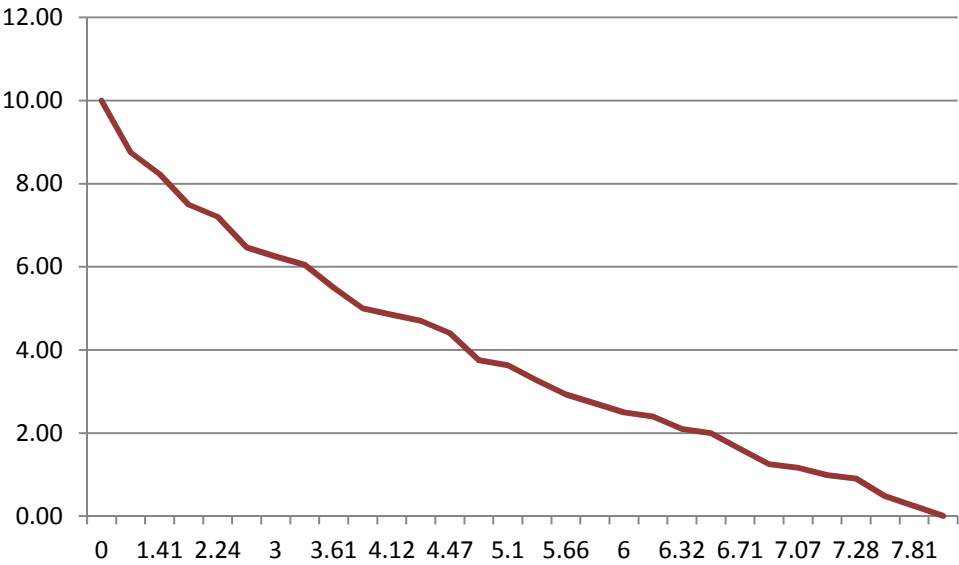
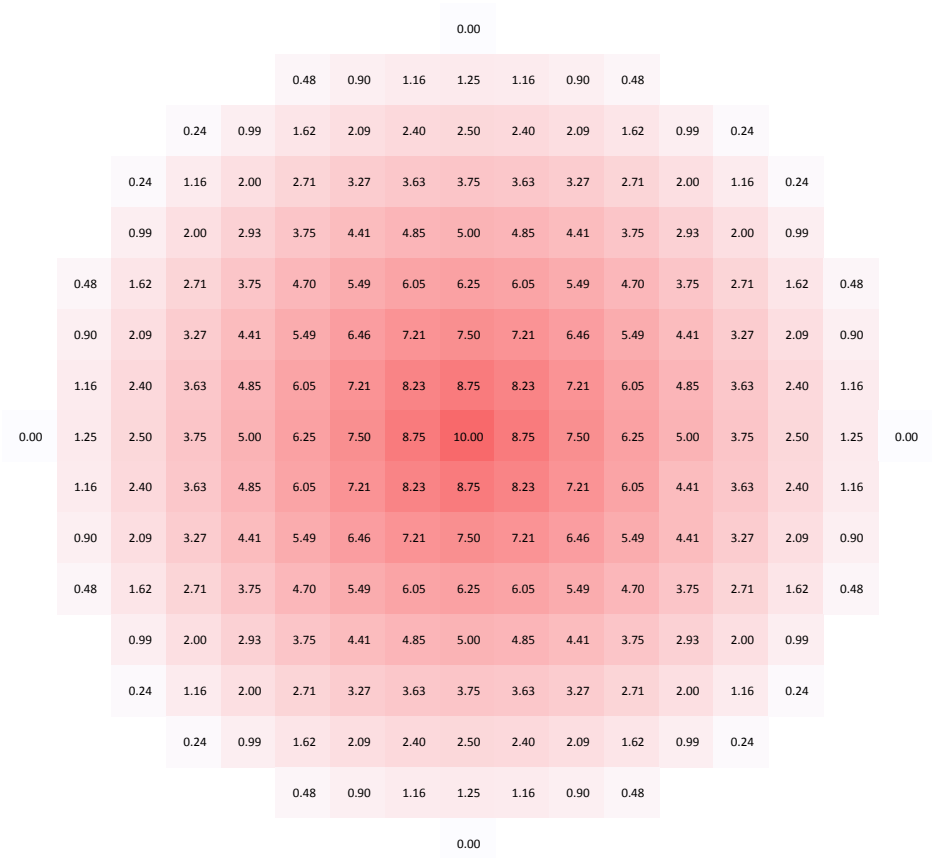
Anexo 1 Pesos aplicados en la calibración y validación del MDUAC

LEYENDA

USOS DE SUELO	NOMBRE
 Grassland	GL
 Wood and Scrub	WS
 Crop	CR
 Degraded Area	DA
 Residential Multi-household	RM
 Residential Single-household	RS
 Industrial	IN
 Facilities	FC
 Office and Retail	OR
 Urban Green	UG
 Infrastructure	IF
 Water	WT

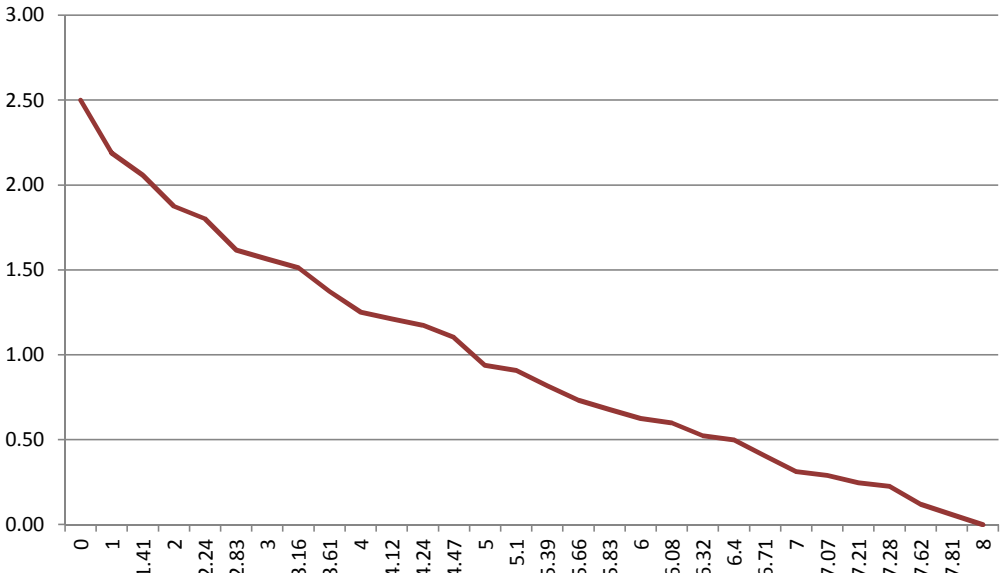
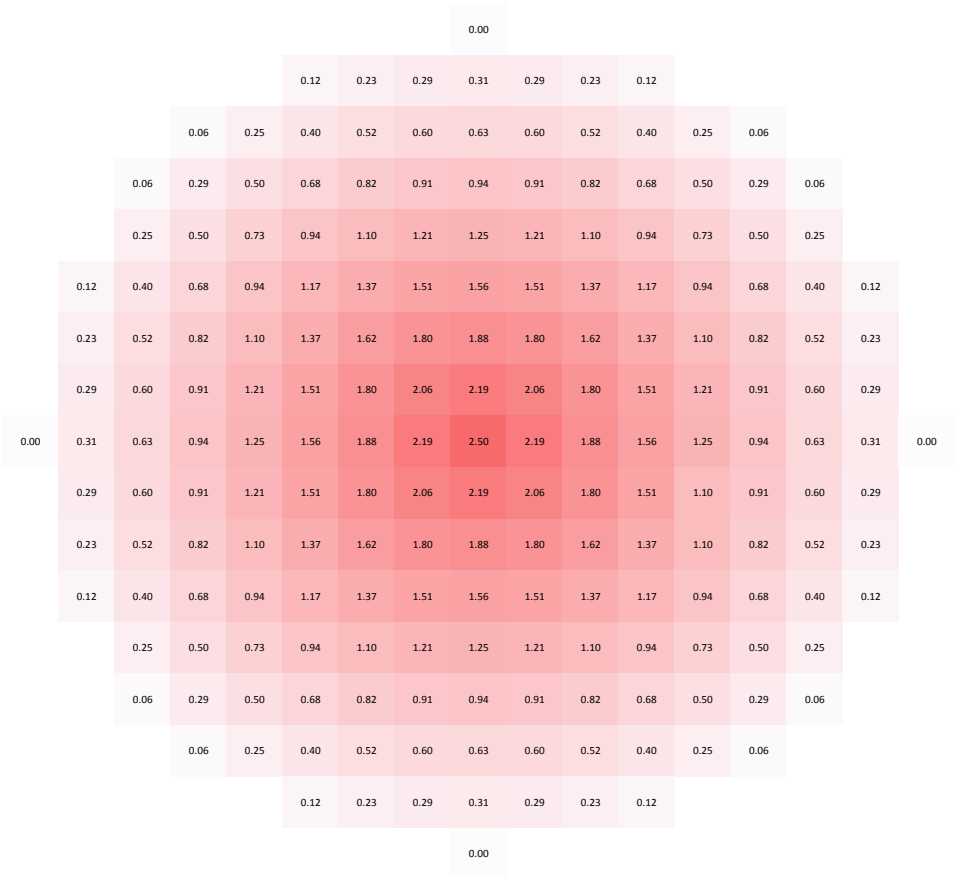
Grassland to RM, RS, IN, FC, OR, UG

m	cells	weight
0	0	10.00
100	1	8.75
141	1.41	8.23
200	2	7.50
224	2.24	7.21
283	2.83	6.46
300	3	6.25
316	3.16	6.05
361	3.61	5.49
400	4	5.00
412	4.12	4.85
424	4.24	4.70
447	4.47	4.41
500	5	3.75
510	5.1	3.63
539	5.39	3.27
566	5.66	2.93
583	5.83	2.71
600	6	2.50
608	6.08	2.40
632	6.32	2.09
640	6.4	2.00
671	6.71	1.62
700	7	1.25
707	7.07	1.16
721	7.21	0.99
728	7.28	0.90
762	7.62	0.48
781	7.81	0.24
800	8	0.00



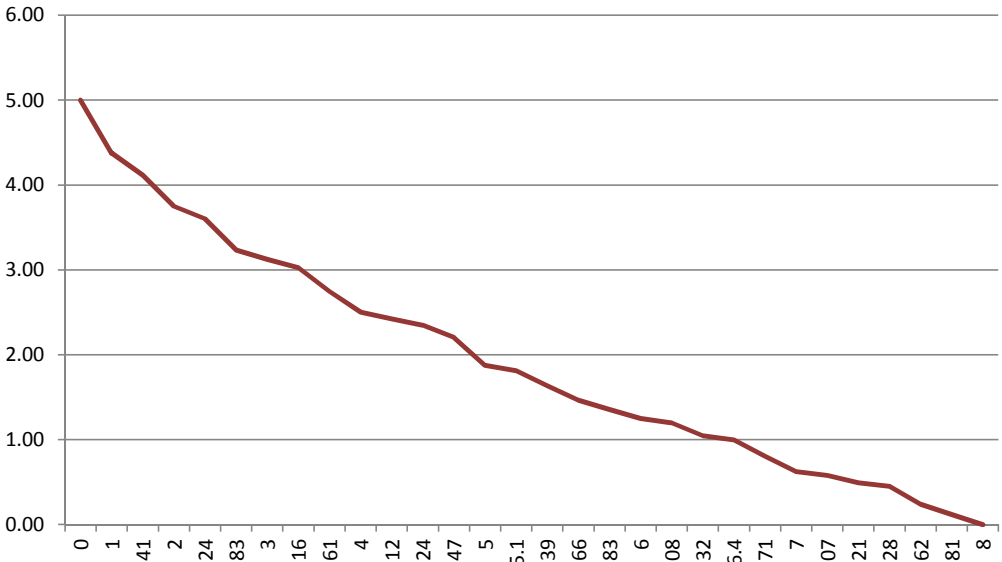
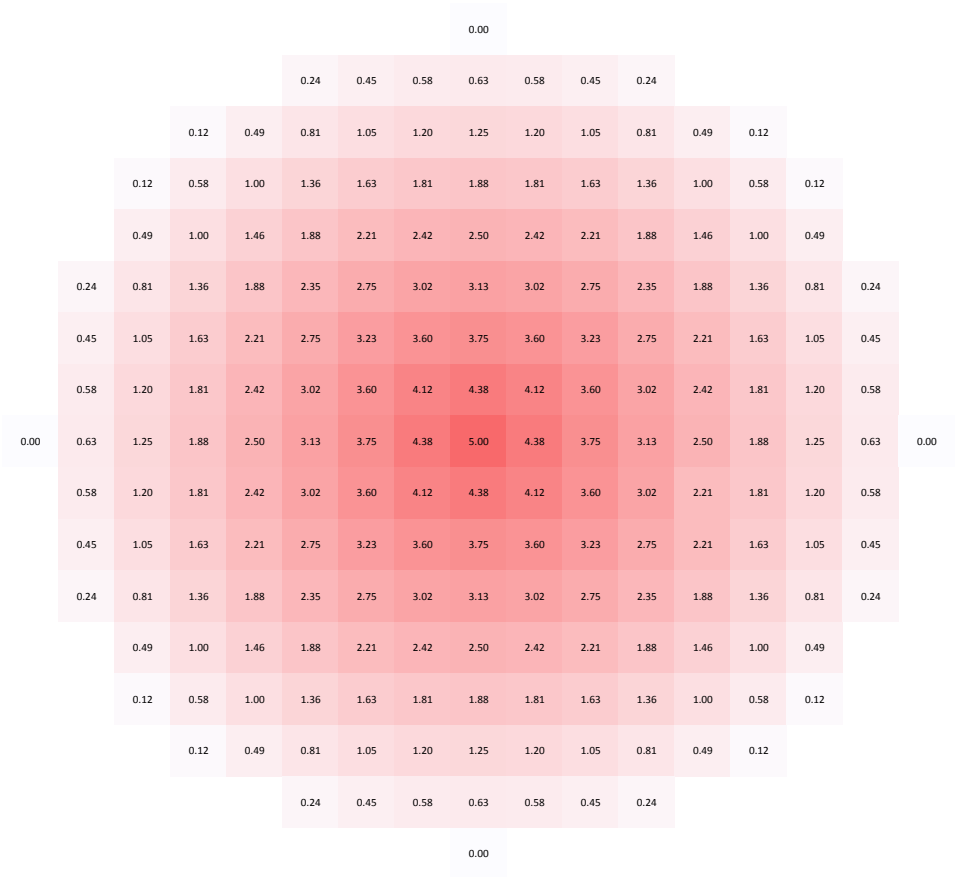
Wood and Scroobs to RM, RS, IN, FC, OR, UG

m	cells	weight
0	0	2.50
100	1	2.19
141	1.41	2.06
200	2	1.88
224	2.24	1.80
283	2.83	1.62
300	3	1.56
316	3.16	1.51
361	3.61	1.37
400	4	1.25
412	4.12	1.21
424	4.24	1.17
447	4.47	1.10
500	5	0.94
510	5.1	0.91
539	5.39	0.82
566	5.66	0.73
583	5.83	0.68
600	6	0.63
608	6.08	0.60
632	6.32	0.52
640	6.4	0.50
671	6.71	0.40
700	7	0.31
707	7.07	0.29
721	7.21	0.25
728	7.28	0.23
762	7.62	0.12
781	7.81	0.06
800	8	0.00



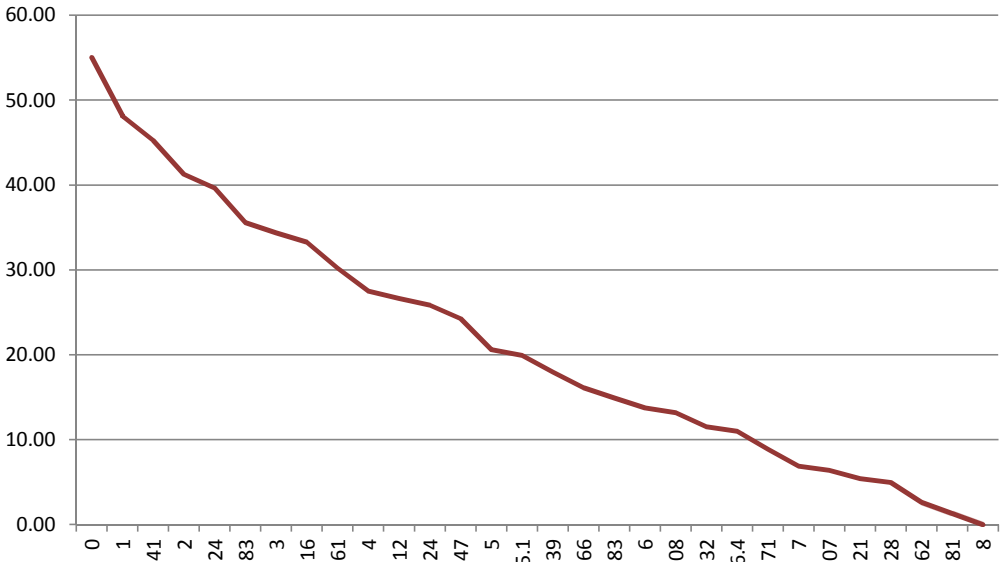
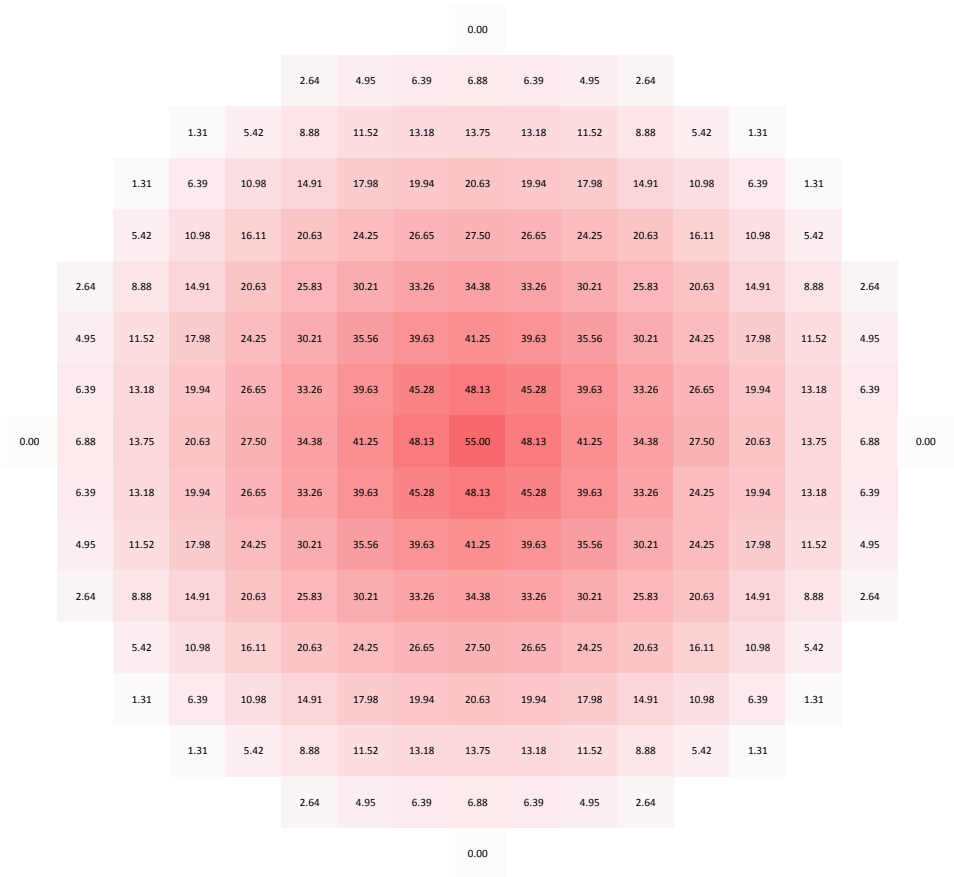
Crops to RM, RS, IN, OR, UG

m	cells	weight
0	0	5.00
100	1	4.38
141	1.41	4.12
200	2	3.75
224	2.24	3.60
283	2.83	3.23
300	3	3.13
316	3.16	3.02
361	3.61	2.75
400	4	2.50
412	4.12	2.42
424	4.24	2.35
447	4.47	2.21
500	5	1.88
510	5.1	1.81
539	5.39	1.63
566	5.66	1.46
583	5.83	1.36
600	6	1.25
608	6.08	1.20
632	6.32	1.05
640	6.4	1.00
671	6.71	0.81
700	7	0.63
707	7.07	0.58
721	7.21	0.49
728	7.28	0.45
762	7.62	0.24
781	7.81	0.12
800	8	0.00



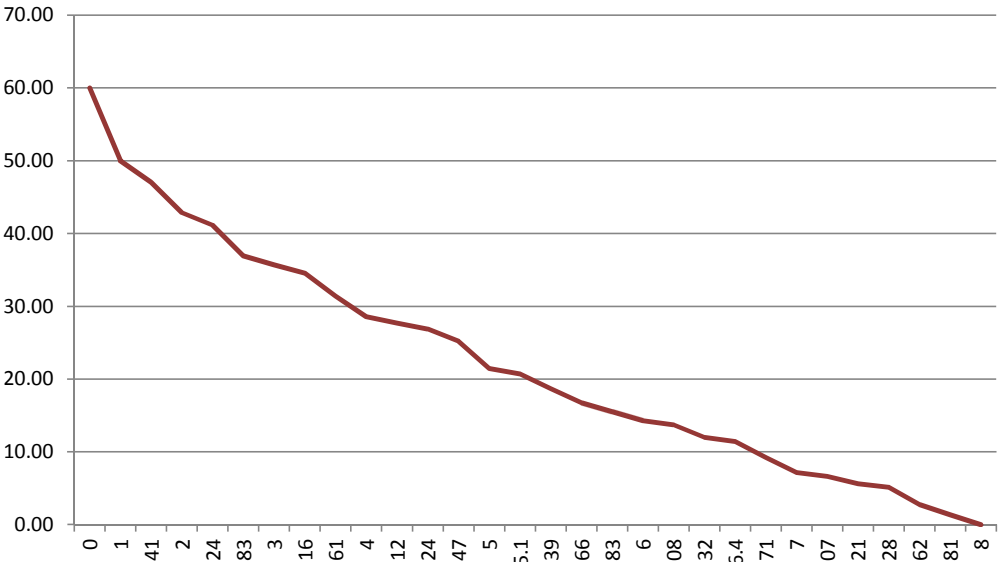
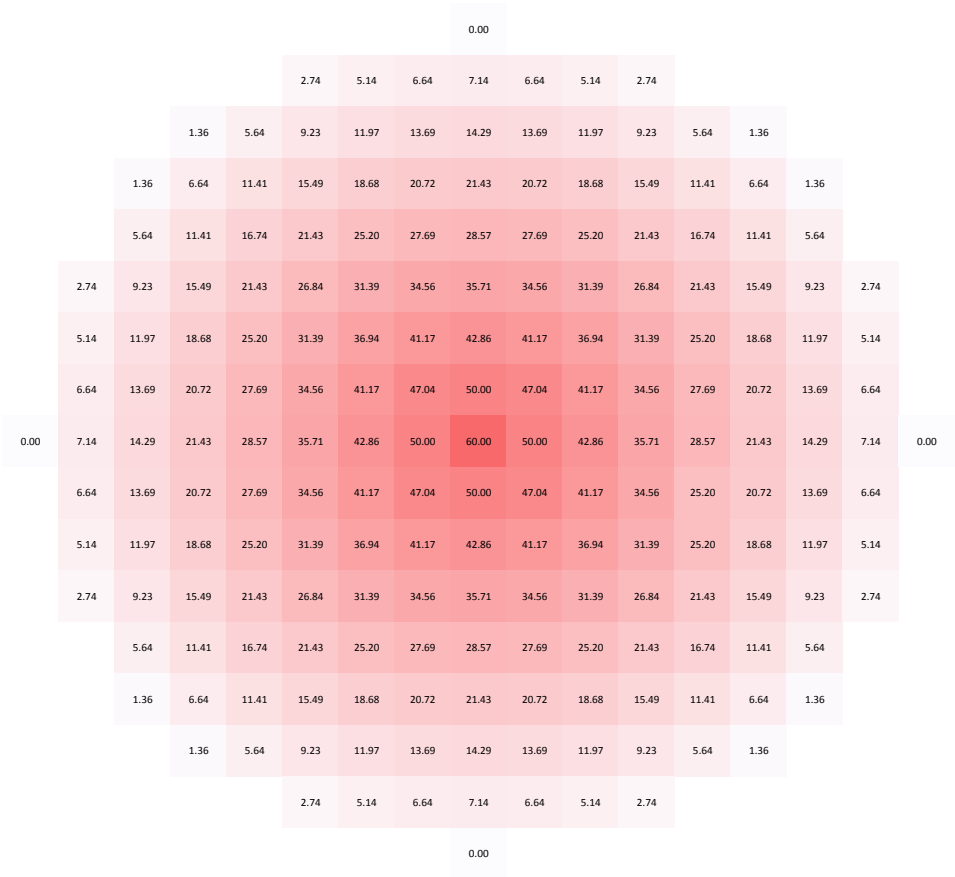
Crops to FC

m	cells	weight
0	0	55.00
100	1	48.13
141	1.41	45.28
200	2	41.25
224	2.24	39.63
283	2.83	35.56
300	3	34.38
316	3.16	33.26
361	3.61	30.21
400	4	27.50
412	4.12	26.65
424	4.24	25.83
447	4.47	24.25
500	5	20.63
510	5.1	19.94
539	5.39	17.98
566	5.66	16.11
583	5.83	14.91
600	6	13.75
608	6.08	13.18
632	6.32	11.52
640	6.4	10.98
671	6.71	8.88
700	7	6.88
707	7.07	6.39
721	7.21	5.42
728	7.28	4.95
762	7.62	2.64
781	7.81	1.31
800	8	0.00



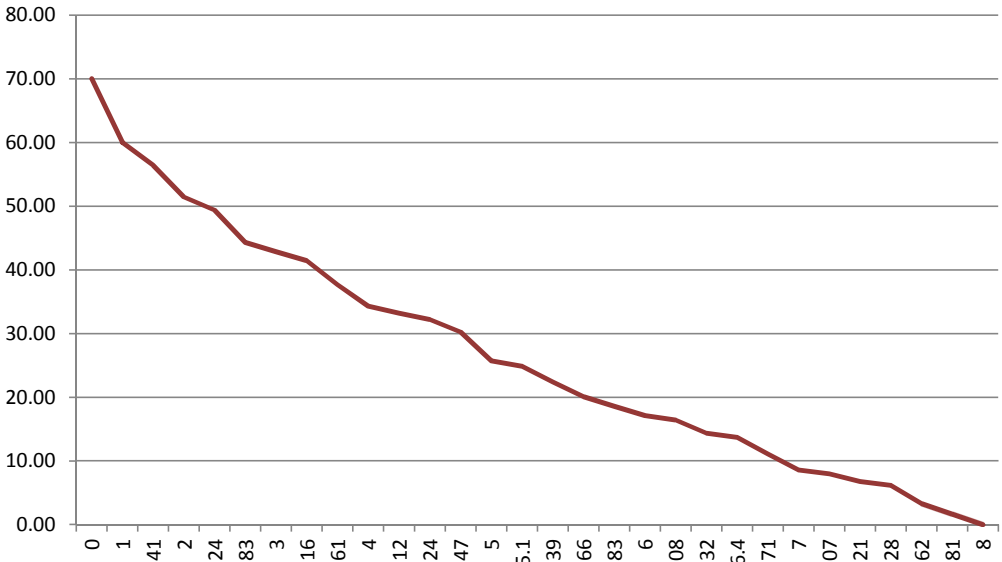
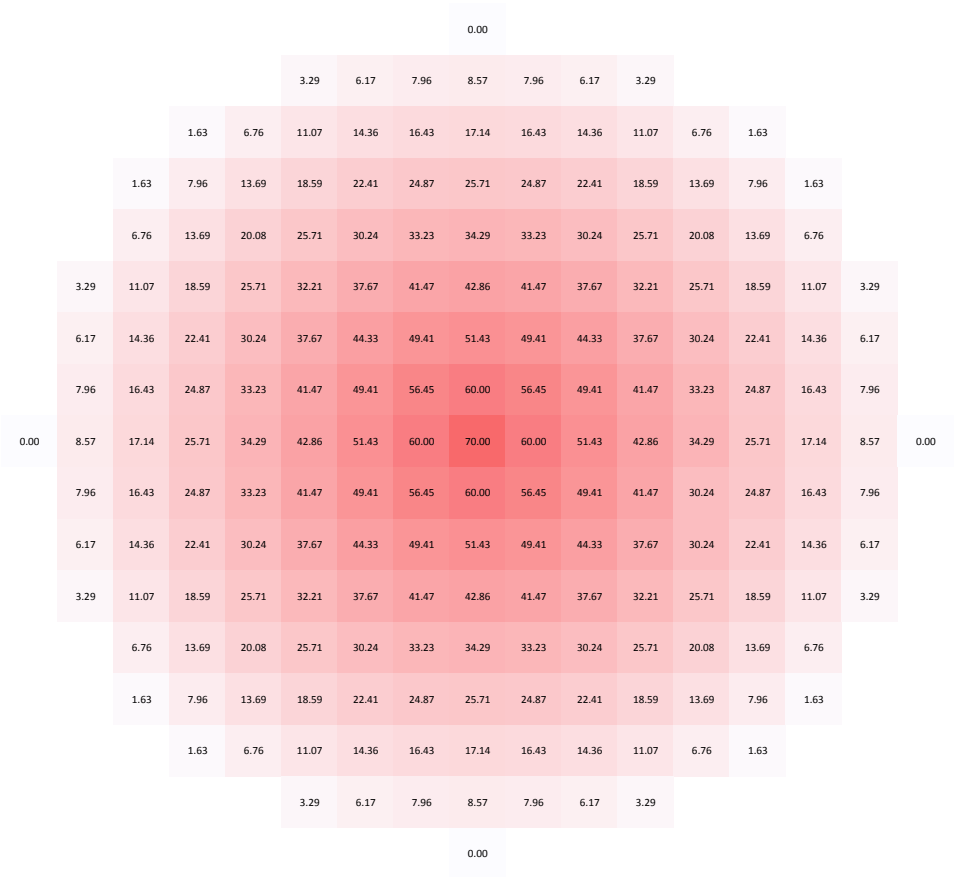
Degraded areas to RM, IN, FC, OR, UG

m	cells	weight
0	0	60.00
100	1	50.00
141	1.41	47.04
200	2	42.86
224	2.24	41.17
283	2.83	36.94
300	3	35.71
316	3.16	34.56
361	3.61	31.39
400	4	28.57
412	4.12	27.69
424	4.24	26.84
447	4.47	25.20
500	5	21.43
510	5.1	20.72
539	5.39	18.68
566	5.66	16.74
583	5.83	15.49
600	6	14.29
608	6.08	13.69
632	6.32	11.97
640	6.4	11.41
671	6.71	9.23
700	7	7.14
707	7.07	6.64
721	7.21	5.64
728	7.28	5.14
762	7.62	2.74
781	7.81	1.36
800	8	0.00



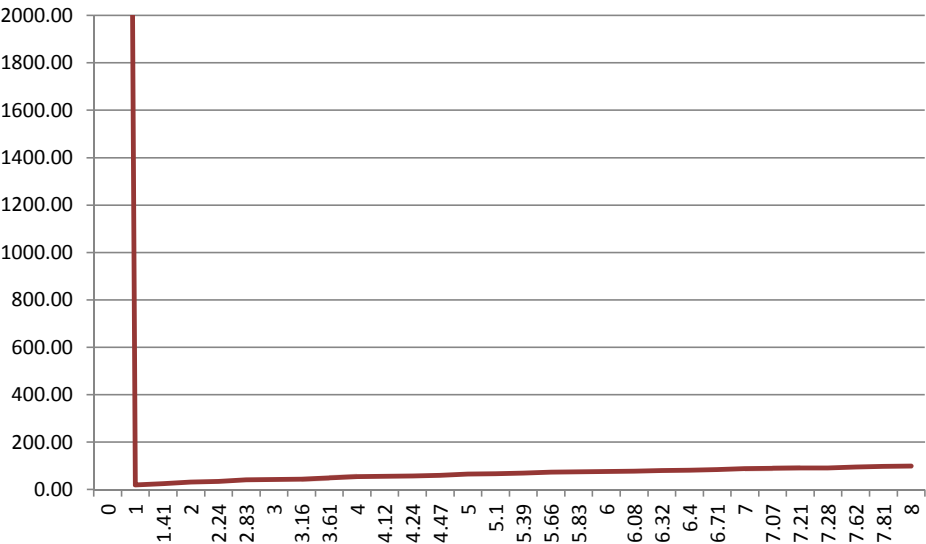
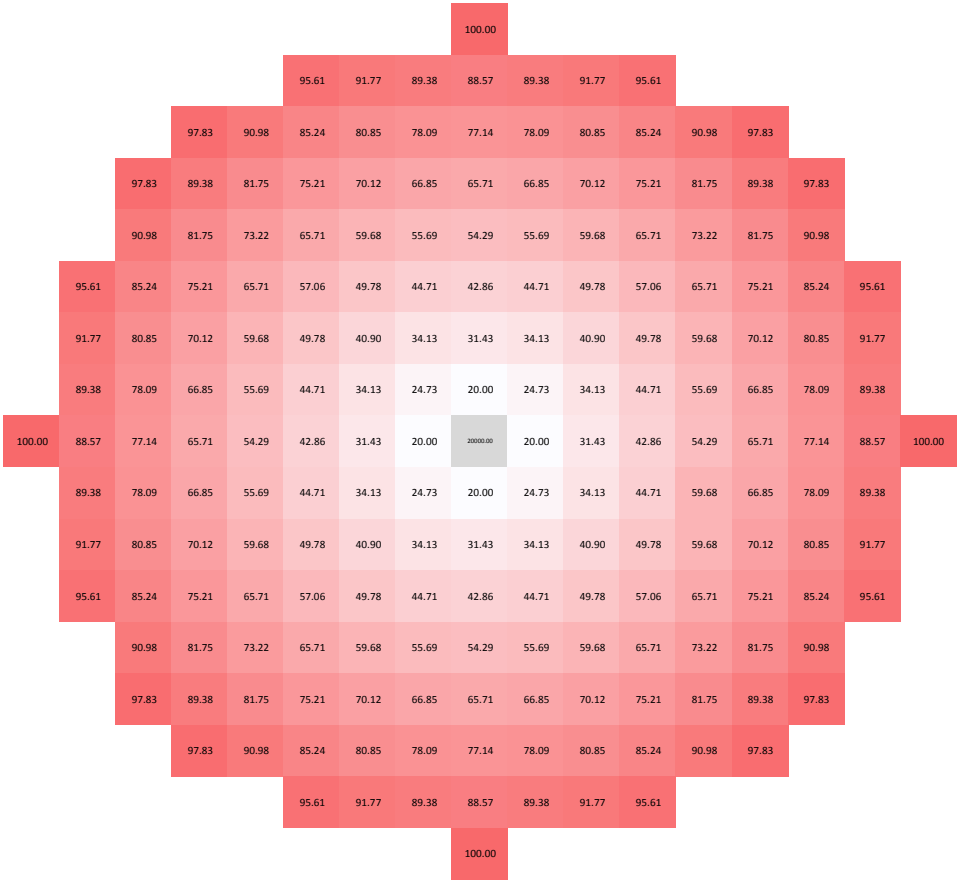
Degraded areas to RS

m	cells	weight
0	0	70.00
100	1	60.00
141	1.41	56.45
200	2	51.43
224	2.24	49.41
283	2.83	44.33
300	3	42.86
316	3.16	41.47
361	3.61	37.67
400	4	34.29
412	4.12	33.23
424	4.24	32.21
447	4.47	30.24
500	5	25.71
510	5.1	24.87
539	5.39	22.41
566	5.66	20.08
583	5.83	18.59
600	6	17.14
608	6.08	16.43
632	6.32	14.36
640	6.4	13.69
671	6.71	11.07
700	7	8.57
707	7.07	7.96
721	7.21	6.76
728	7.28	6.17
762	7.62	3.29
781	7.81	1.63
800	8	0.00



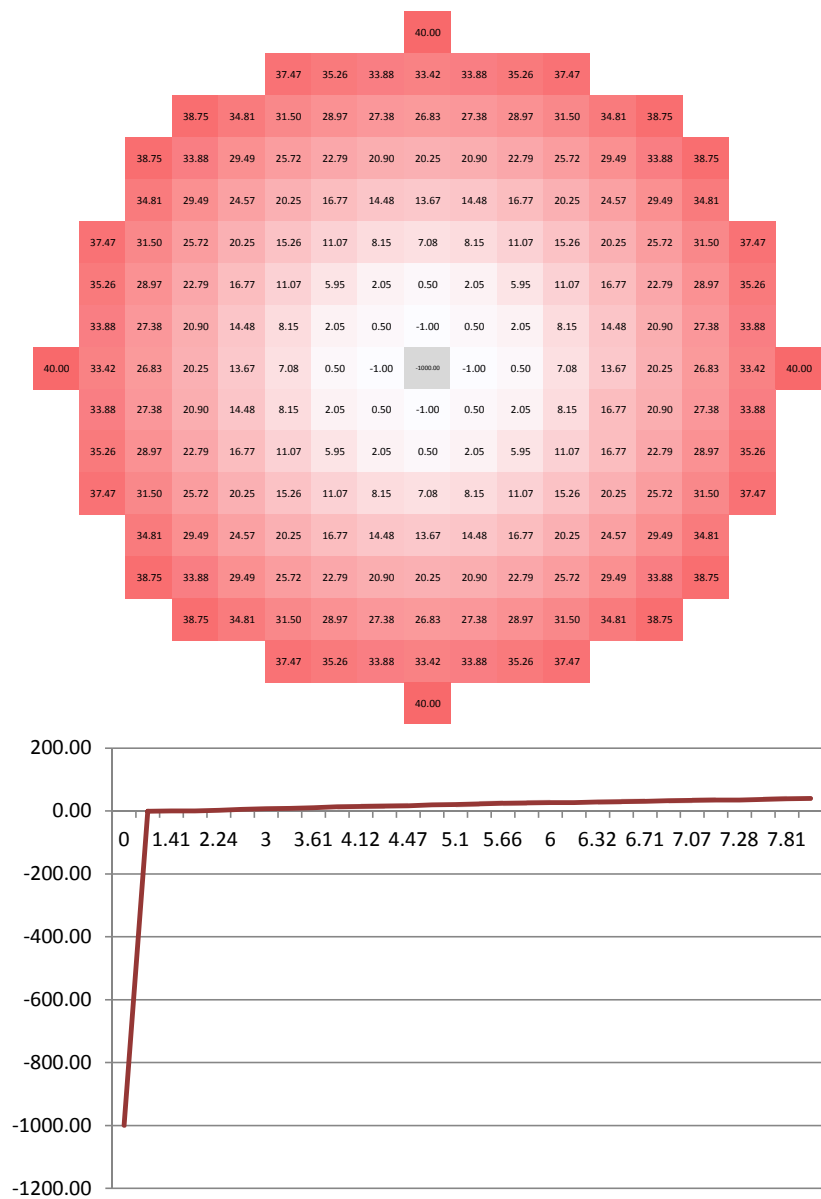
Residential Multi-household to RM

m	cells	weight
0	0	20000.00
100	1	20.00
141	1.41	24.73
200	2	31.43
224	2.24	34.13
283	2.83	40.90
300	3	42.86
316	3.16	44.71
361	3.61	49.78
400	4	54.29
412	4.12	55.69
424	4.24	57.06
447	4.47	59.68
500	5	65.71
510	5.1	66.85
539	5.39	70.12
566	5.66	73.22
583	5.83	75.21
600	6	77.14
608	6.08	78.09
632	6.32	80.85
640	6.4	81.75
671	6.71	85.24
700	7	88.57
707	7.07	89.38
721	7.21	90.98
728	7.28	91.77
762	7.62	95.61
781	7.81	97.83
800	8	100.00



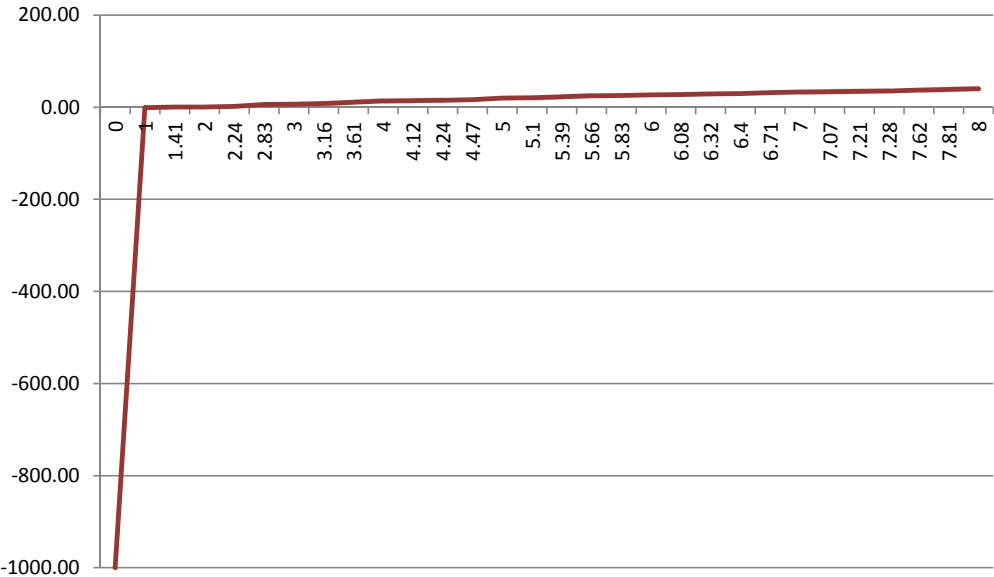
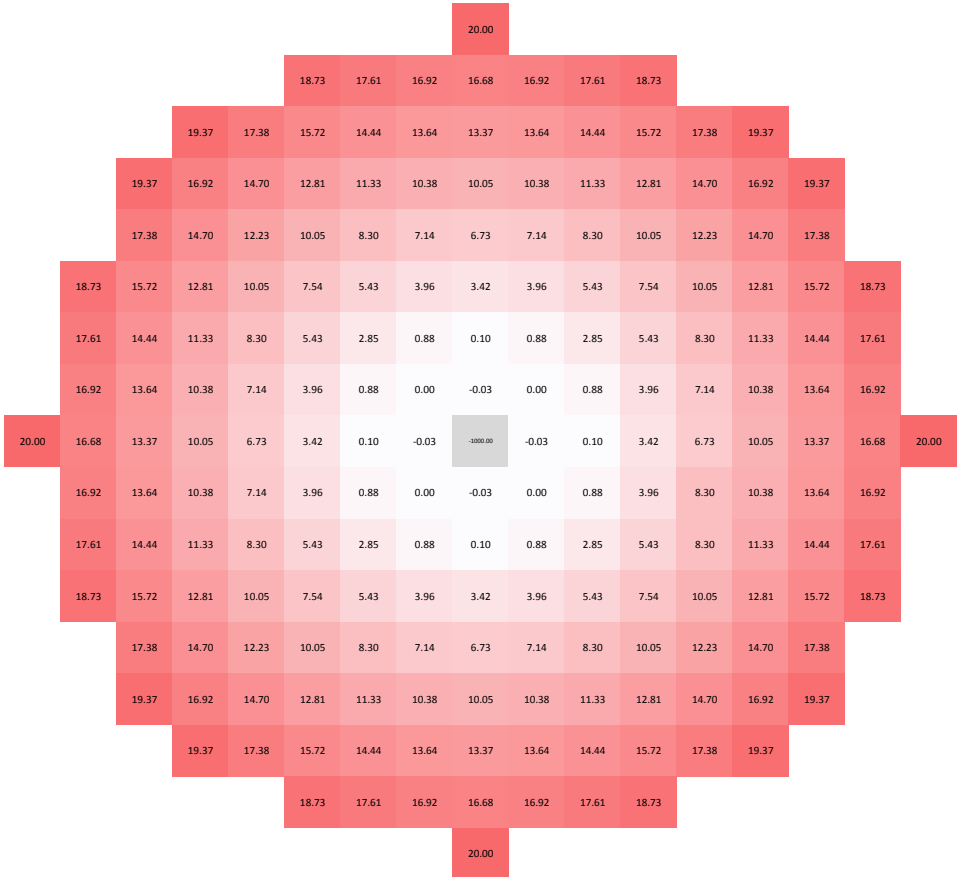
Residential Multi-household to Rs

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	-1.00
141	1.41	0.50
200	2	0.50
224	2.24	2.05
283	2.83	5.95
300	3	7.08
316	3.16	8.15
361	3.61	11.07
400	4	13.67
412	4.12	14.48
424	4.24	15.26
447	4.47	16.77
500	5	20.25
510	5.1	20.90
539	5.39	22.79
566	5.66	24.57
583	5.83	25.72
600	6	26.83
608	6.08	27.38
632	6.32	28.97
640	6.4	29.49
671	6.71	31.50
700	7	33.42
707	7.07	33.88
721	7.21	34.81
728	7.28	35.26
762	7.62	37.47
781	7.81	38.75
800	8	40.00



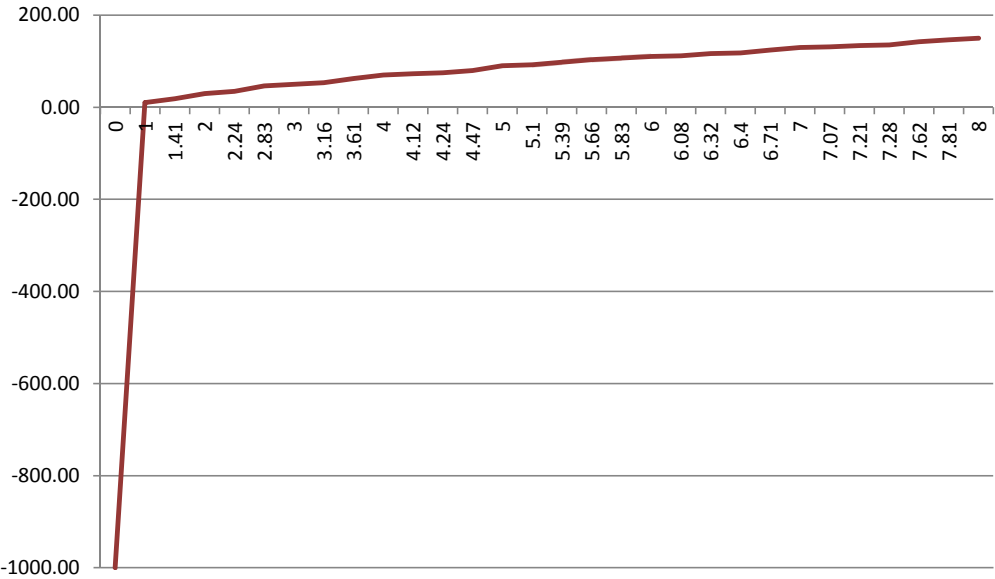
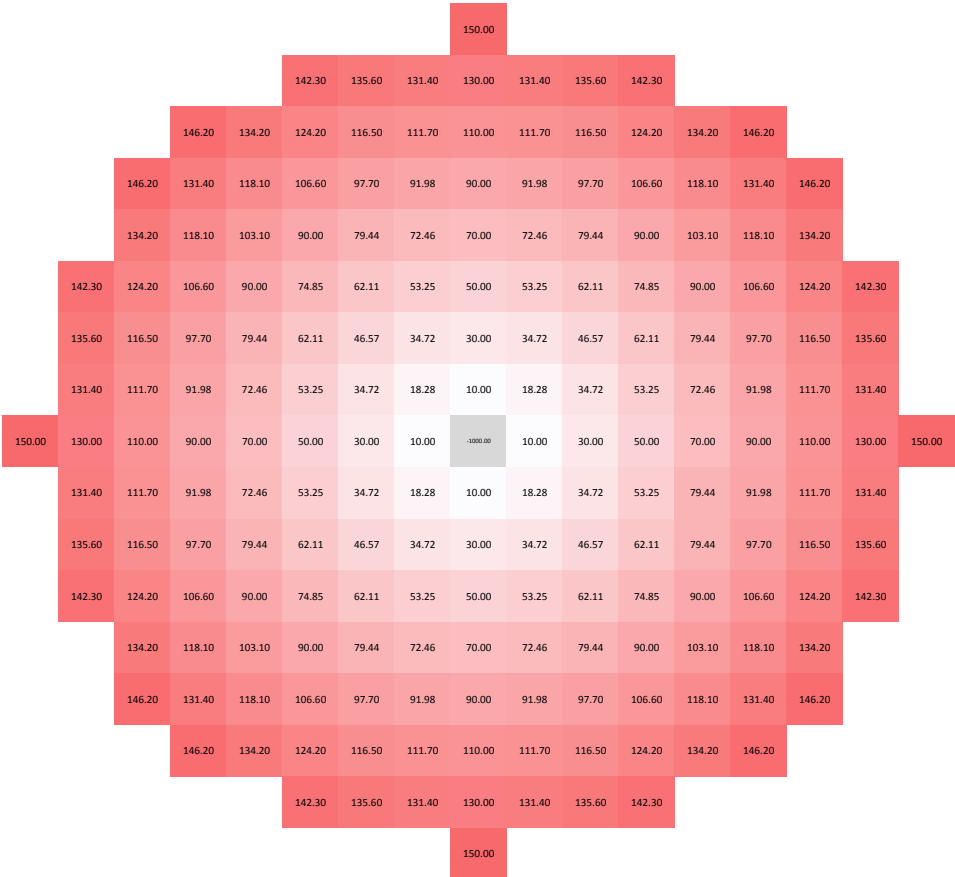
Residential Multi-household to IN

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	-0.03
141	1.41	0.00
200	2	0.10
224	2.24	0.88
283	2.83	2.85
300	3	3.42
316	3.16	3.96
361	3.61	5.43
400	4	6.73
412	4.12	7.14
424	4.24	7.54
447	4.47	8.30
500	5	10.05
510	5.1	10.38
539	5.39	11.33
566	5.66	12.23
583	5.83	12.81
600	6	13.37
608	6.08	13.64
632	6.32	14.44
640	6.4	14.70
671	6.71	15.72
700	7	16.68
707	7.07	16.92
721	7.21	17.38
728	7.28	17.61
762	7.62	18.73
781	7.81	19.37
800	8	20.00



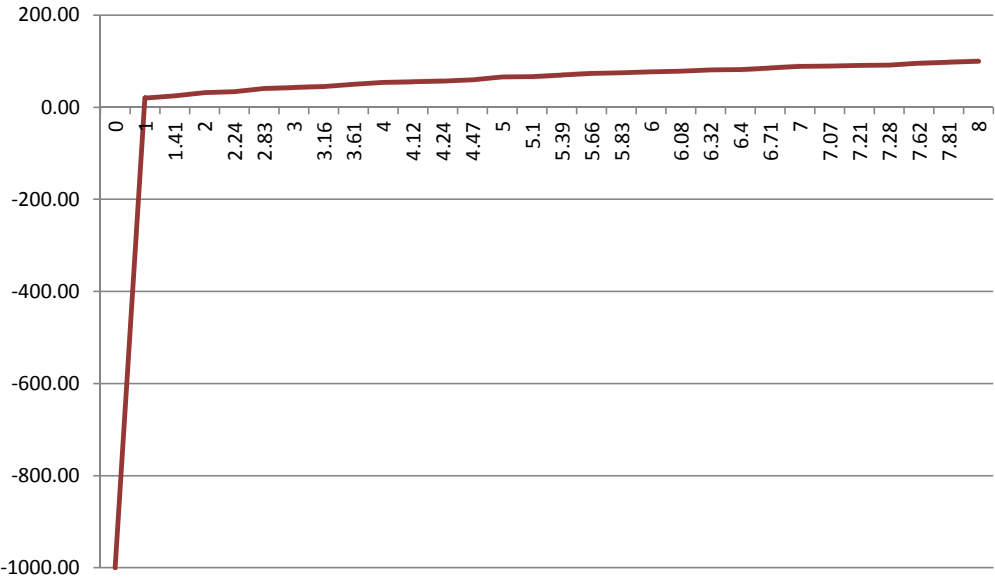
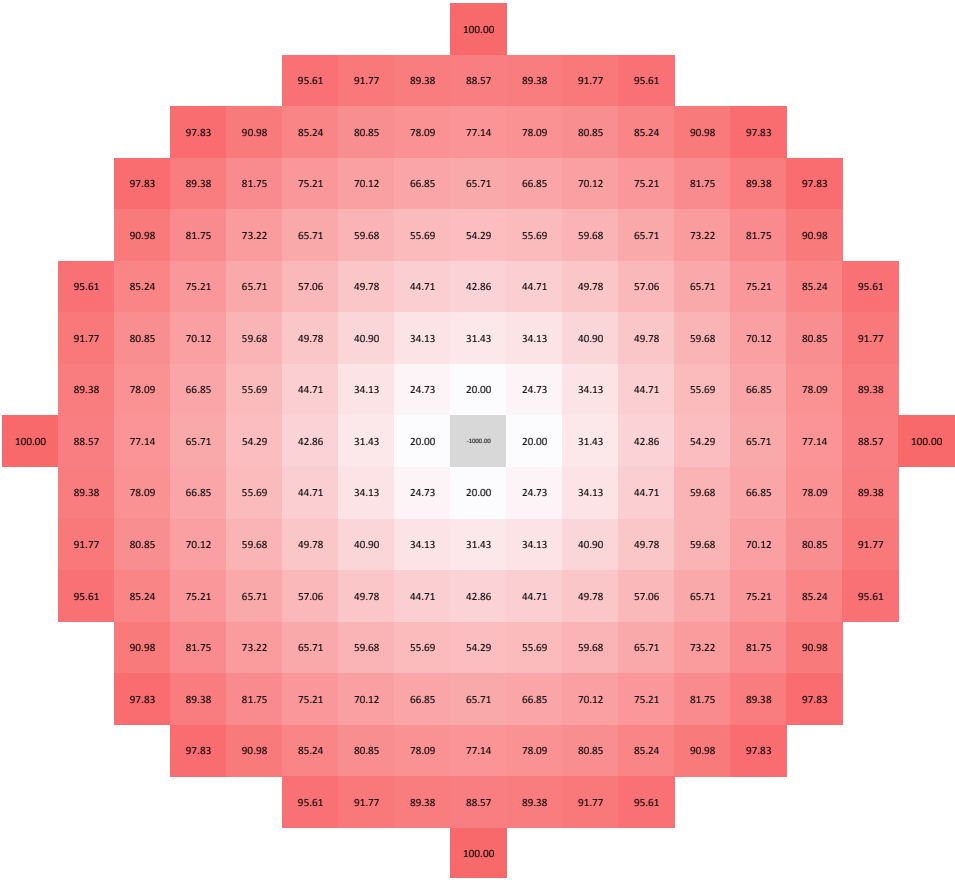
Residential Multi-household to FC, UG

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	10.00
141	1.41	18.28
200	2	30.00
224	2.24	34.72
283	2.83	46.57
300	3	50.00
316	3.16	53.25
361	3.61	62.11
400	4	70.00
412	4.12	72.46
424	4.24	74.85
447	4.47	79.44
500	5	90.00
510	5.1	91.98
539	5.39	97.70
566	5.66	103.10
583	5.83	106.60
600	6	110.00
608	6.08	111.70
632	6.32	116.50
640	6.4	118.10
671	6.71	124.20
700	7	130.00
707	7.07	131.40
721	7.21	134.20
728	7.28	135.60
762	7.62	142.30
781	7.81	146.20
800	8	150.00



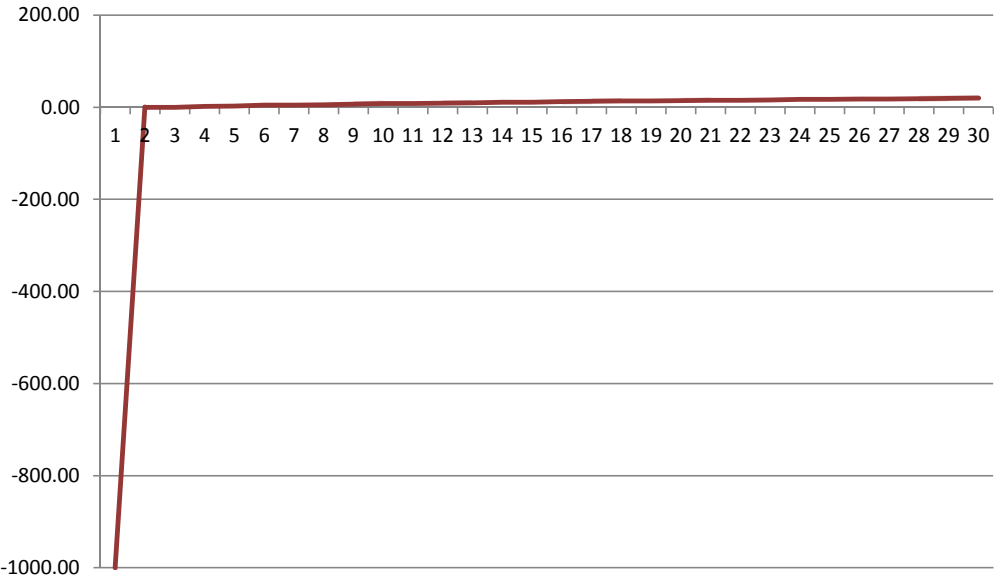
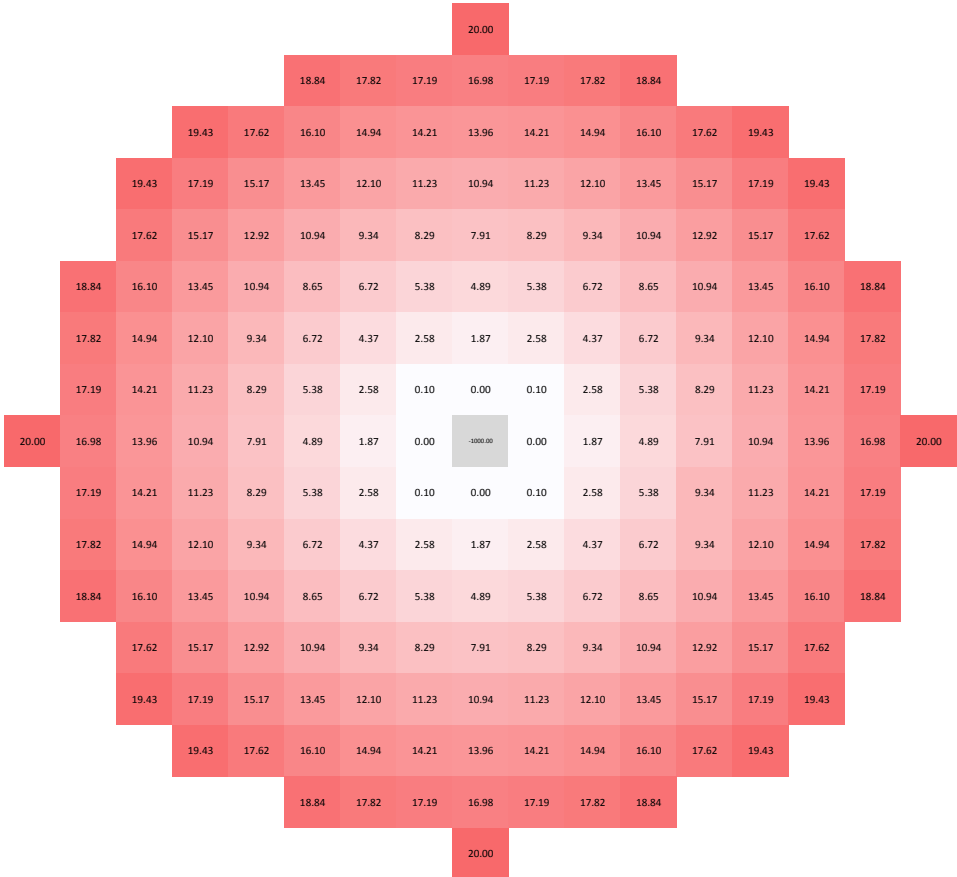
Residential Multi-household to OR

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	20.00
141	1.41	24.73
200	2	31.43
224	2.24	34.13
283	2.83	40.90
300	3	42.86
316	3.16	44.71
361	3.61	49.78
400	4	54.29
412	4.12	55.69
424	4.24	57.06
447	4.47	59.68
500	5	65.71
510	5.1	66.85
539	5.39	70.12
566	5.66	73.22
583	5.83	75.21
600	6	77.14
608	6.08	78.09
632	6.32	80.85
640	6.4	81.75
671	6.71	85.24
700	7	88.57
707	7.07	89.38
721	7.21	90.98
728	7.28	91.77
762	7.62	95.61
781	7.81	97.83
800	8	100.00



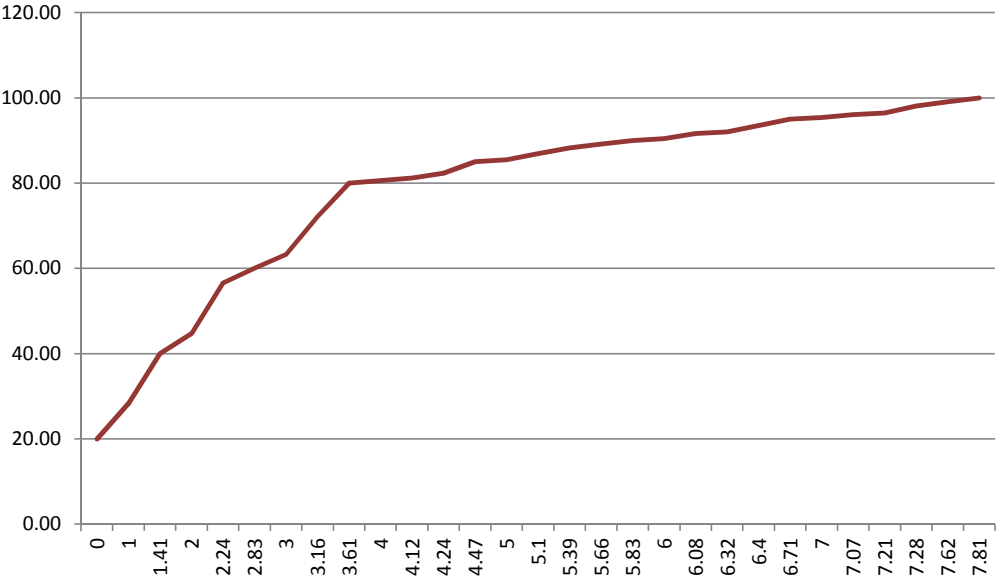
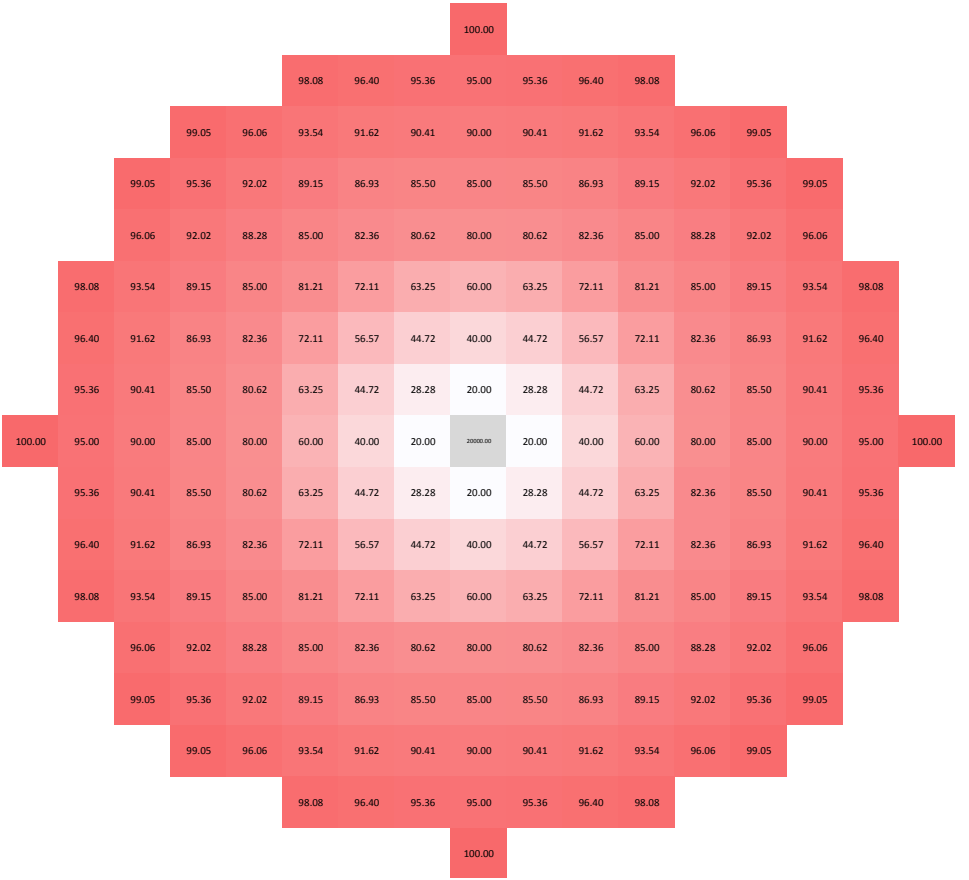
Residential Single-household to RM

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	0.00
141	1.41	0.10
200	2	1.87
224	2.24	2.58
283	2.83	4.37
300	3	4.89
316	3.16	5.38
361	3.61	6.72
400	4	7.91
412	4.12	8.29
424	4.24	8.65
447	4.47	9.34
500	5	10.94
510	5.1	11.23
539	5.39	12.10
566	5.66	12.92
583	5.83	13.45
600	6	13.96
608	6.08	14.21
632	6.32	14.94
640	6.4	15.17
671	6.71	16.10
700	7	16.98
707	7.07	17.19
721	7.21	17.62
728	7.28	17.82
762	7.62	18.84
781	7.81	19.43
800	8	20.00



Residential Single-household to RS*

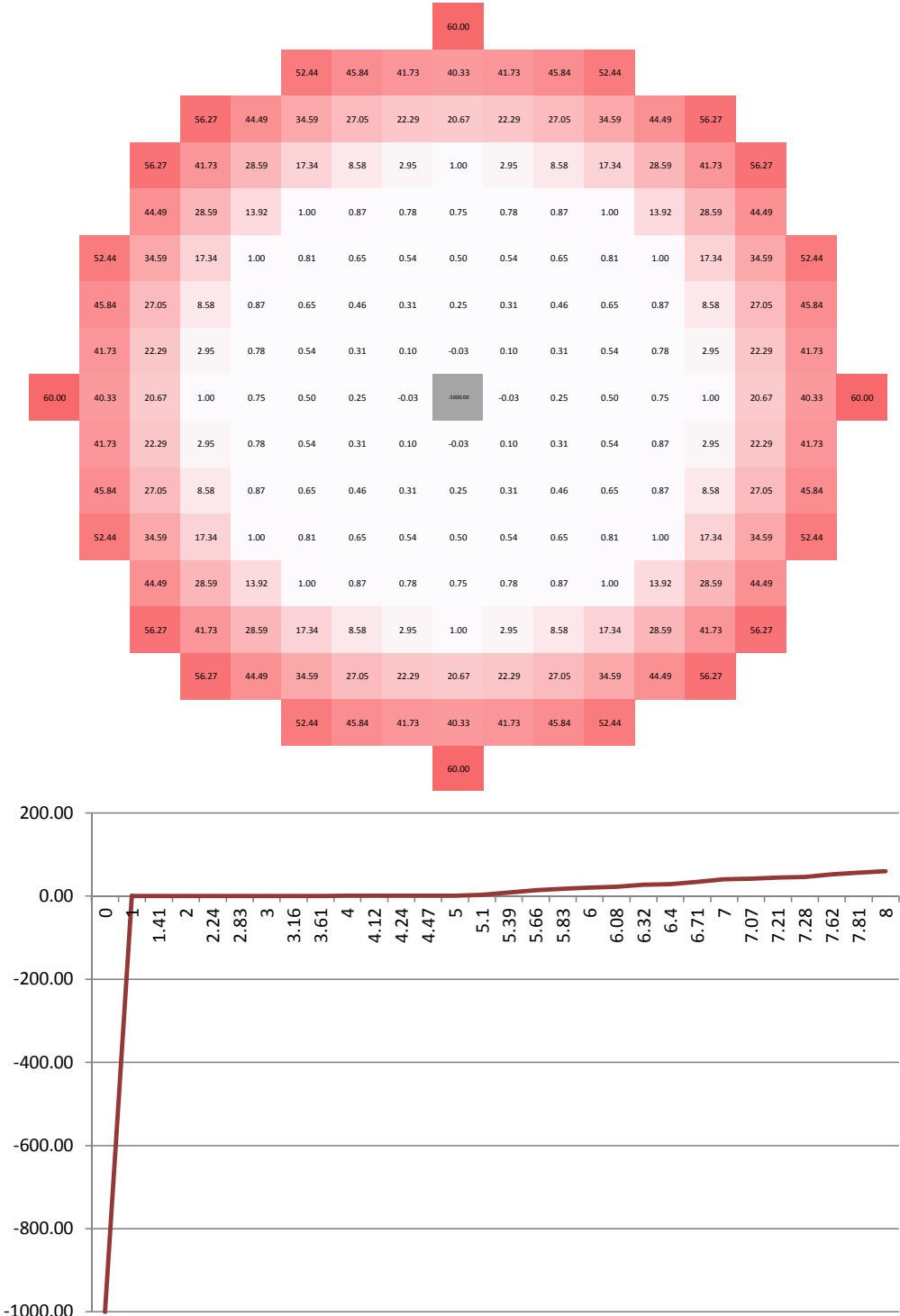
m	cells	weight
0	0	20000.00
100	1	20.00
141	1.41	28.28
200	2	40.00
224	2.24	44.72
283	2.83	56.57
300	3	60.00
316	3.16	63.25
361	3.61	72.11
400	4	80.00
412	4.12	80.62
424	4.24	81.21
447	4.47	82.36
500	5	85.00
510	5.1	85.50
539	5.39	86.93
566	5.66	88.28
583	5.83	89.15
600	6	90.00
608	6.08	90.41
632	6.32	91.62
640	6.4	92.02
671	6.71	93.54
700	7	95.00
707	7.07	95.36
721	7.21	96.06
728	7.28	96.40
762	7.62	98.08
781	7.81	99.05
800	8	100.00



* Valor 0-20000 no representado en gráfico

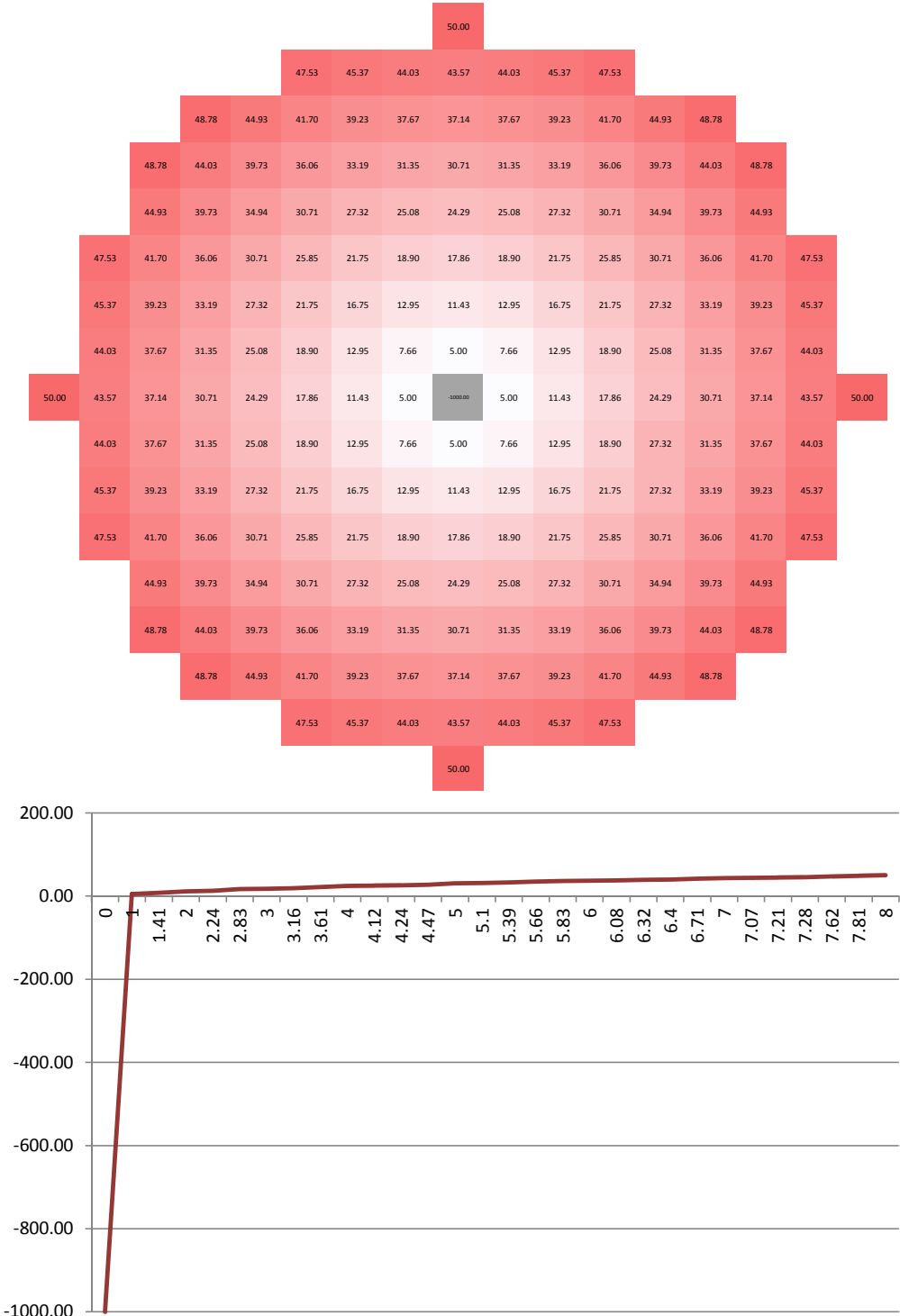
Residential Single-household to IN

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	-0.03
141	1.41	0.10
200	2	0.25
224	2.24	0.31
283	2.83	0.46
300	3	0.50
316	3.16	0.54
361	3.61	0.65
400	4	0.75
412	4.12	0.78
424	4.24	0.81
447	4.47	0.87
500	5	1.00
510	5.1	2.95
539	5.39	8.58
566	5.66	13.92
583	5.83	17.34
600	6	20.67
608	6.08	22.29
632	6.32	27.05
640	6.4	28.59
671	6.71	34.59
700	7	40.33
707	7.07	41.73
721	7.21	44.49
728	7.28	45.84
762	7.62	52.44
781	7.81	56.27
800	8	60.00



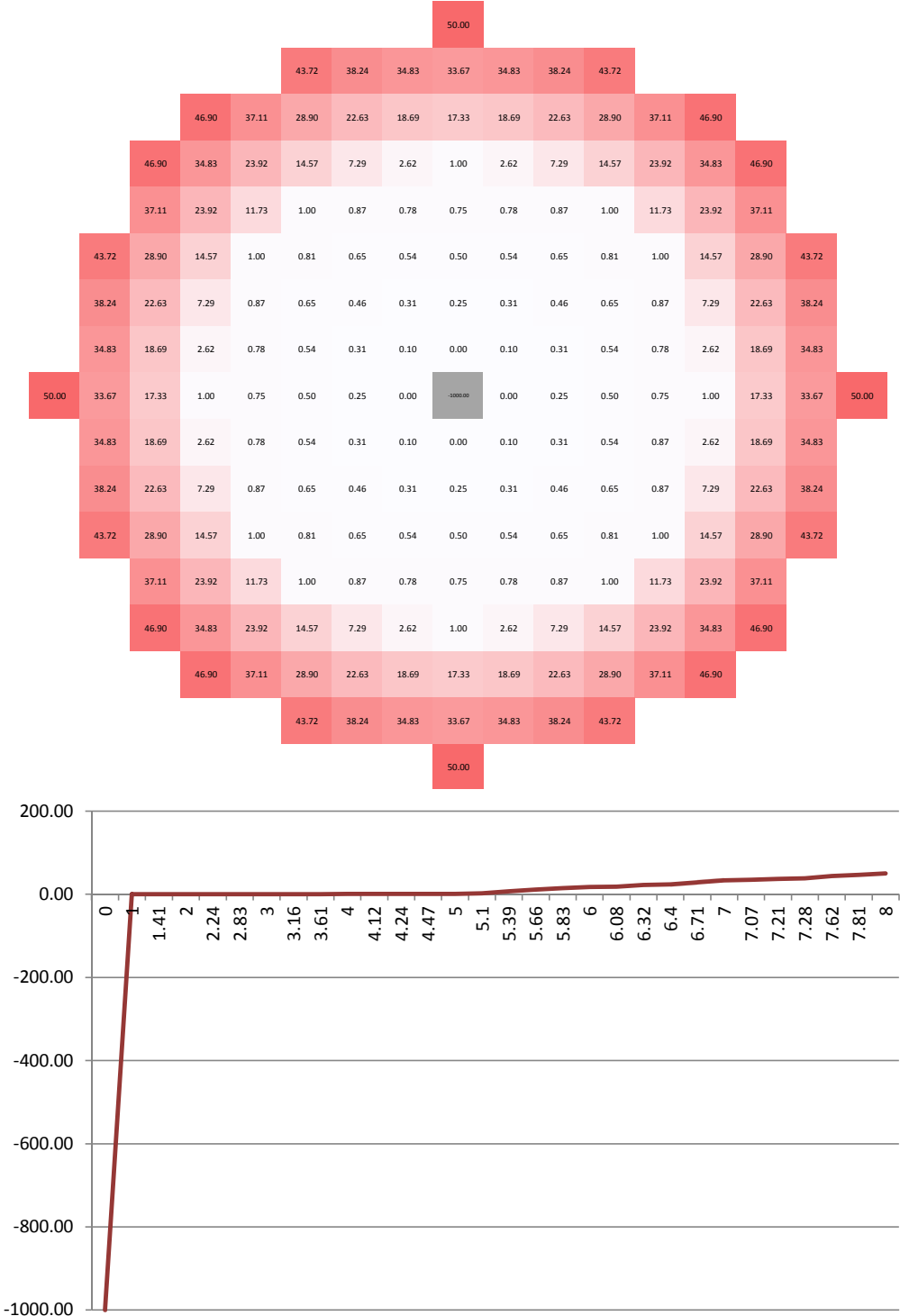
Residential Single-household to FC

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	7.66
200	2	11.43
224	2.24	12.95
283	2.83	16.75
300	3	17.86
316	3.16	18.90
361	3.61	21.75
400	4	24.29
412	4.12	25.08
424	4.24	25.85
447	4.47	27.32
500	5	30.71
510	5.1	31.35
539	5.39	33.19
566	5.66	34.94
583	5.83	36.06
600	6	37.14
608	6.08	37.67
632	6.32	39.23
640	6.4	39.73
671	6.71	41.70
700	7	43.57
707	7.07	44.03
721	7.21	44.93
728	7.28	45.37
762	7.62	47.53
781	7.81	48.78
800	8	50.00



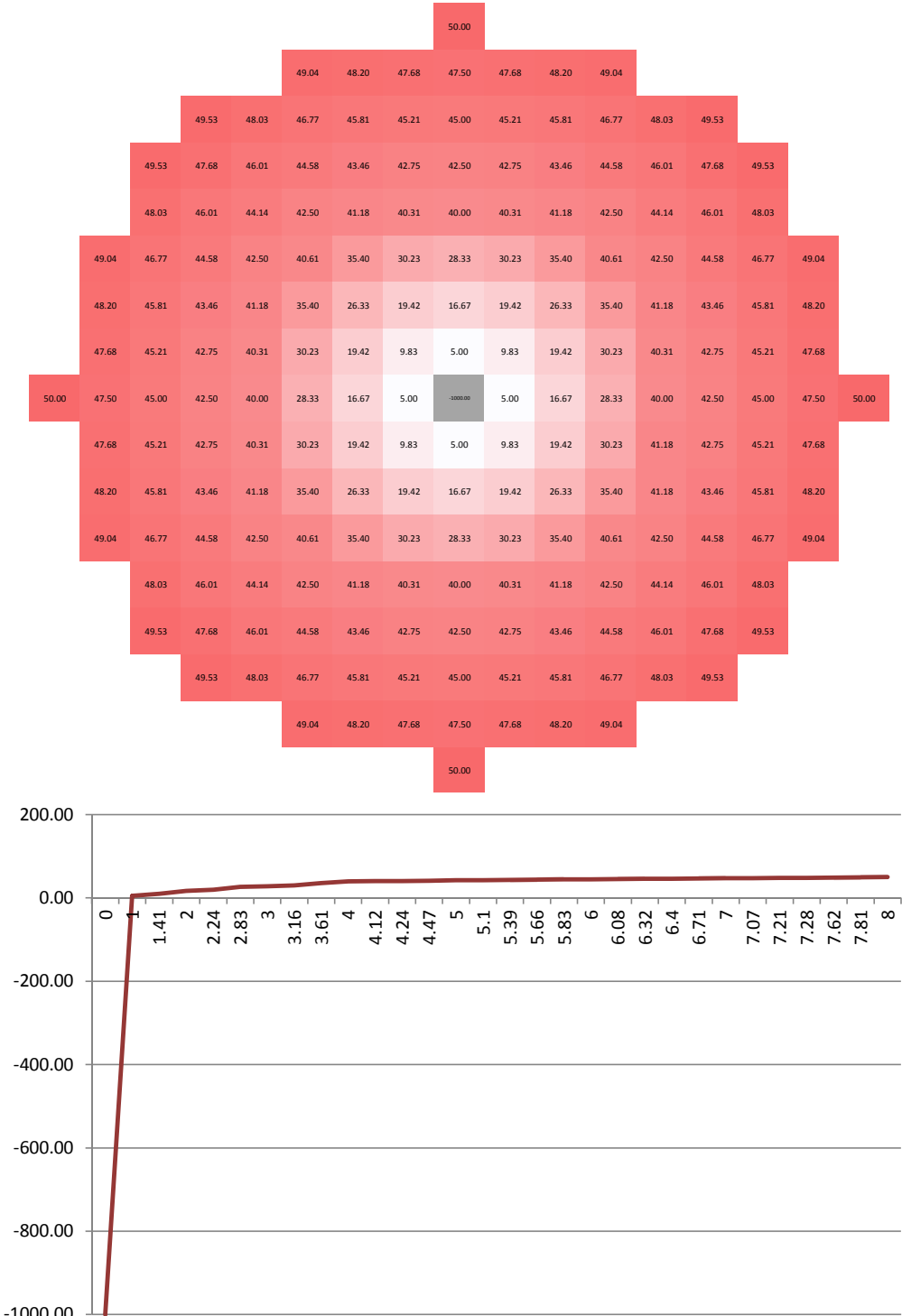
Residential Single-household to OR

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	0.00
141	1.41	0.10
200	2	0.25
224	2.24	0.31
283	2.83	0.46
300	3	0.50
316	3.16	0.54
361	3.61	0.65
400	4	0.75
412	4.12	0.78
424	4.24	0.81
447	4.47	0.87
500	5	1.00
510	5.1	2.62
539	5.39	7.29
566	5.66	11.73
583	5.83	14.57
600	6	17.33
608	6.08	18.69
632	6.32	22.63
640	6.4	23.92
671	6.71	28.90
700	7	33.67
707	7.07	34.83
721	7.21	37.11
728	7.28	38.24
762	7.62	43.72
781	7.81	46.90
800	8	50.00



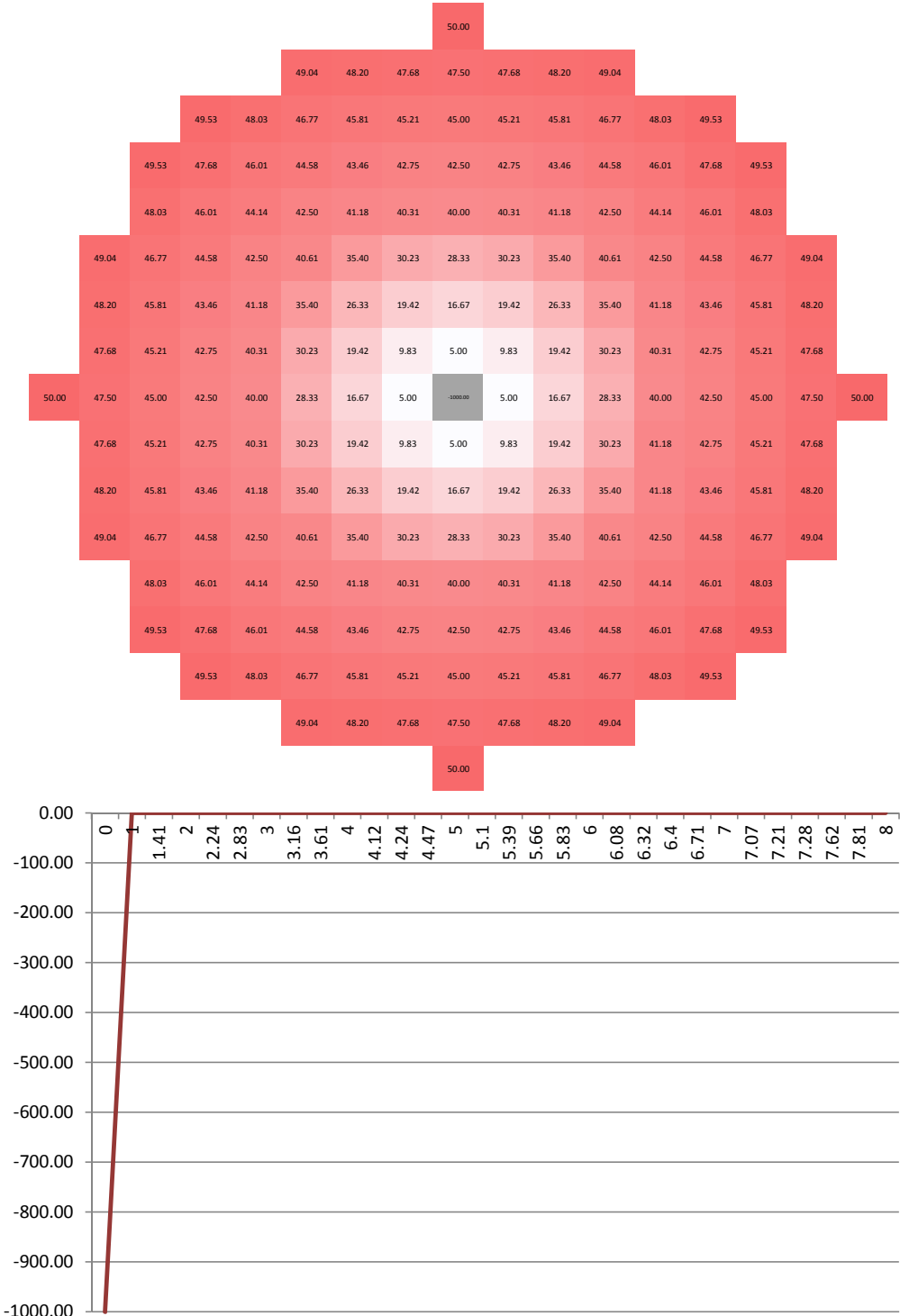
Residential Single-household to UG

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	9.83
200	2	16.67
224	2.24	19.42
283	2.83	26.33
300	3	28.33
316	3.16	30.23
361	3.61	35.40
400	4	40.00
412	4.12	40.31
424	4.24	40.61
447	4.47	41.18
500	5	42.50
510	5.1	42.75
539	5.39	43.46
566	5.66	44.14
583	5.83	44.58
600	6	45.00
608	6.08	45.21
632	6.32	45.81
640	6.4	46.01
671	6.71	46.77
700	7	47.50
707	7.07	47.68
721	7.21	48.03
728	7.28	48.20
762	7.62	49.04
781	7.81	49.53
800	8	50.00



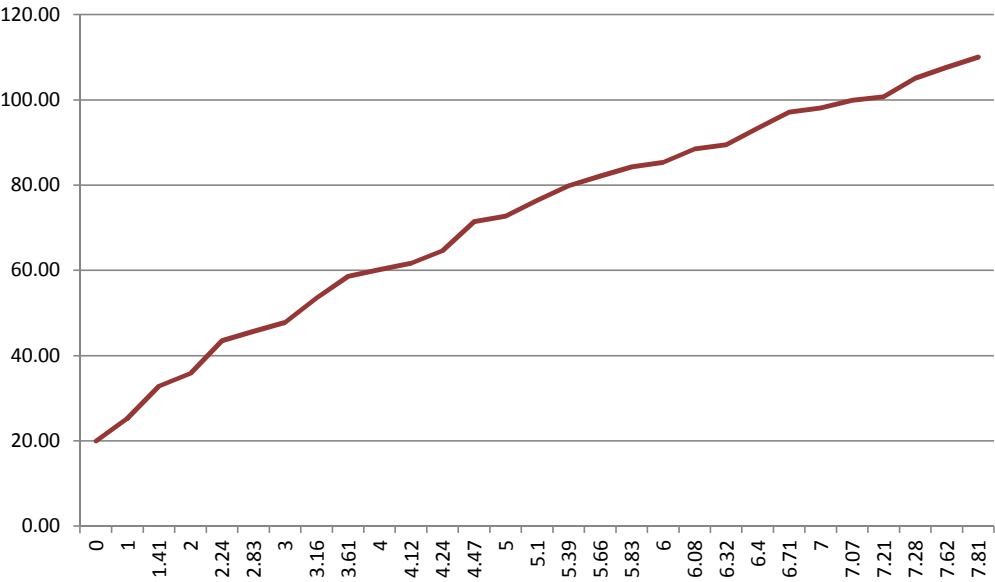
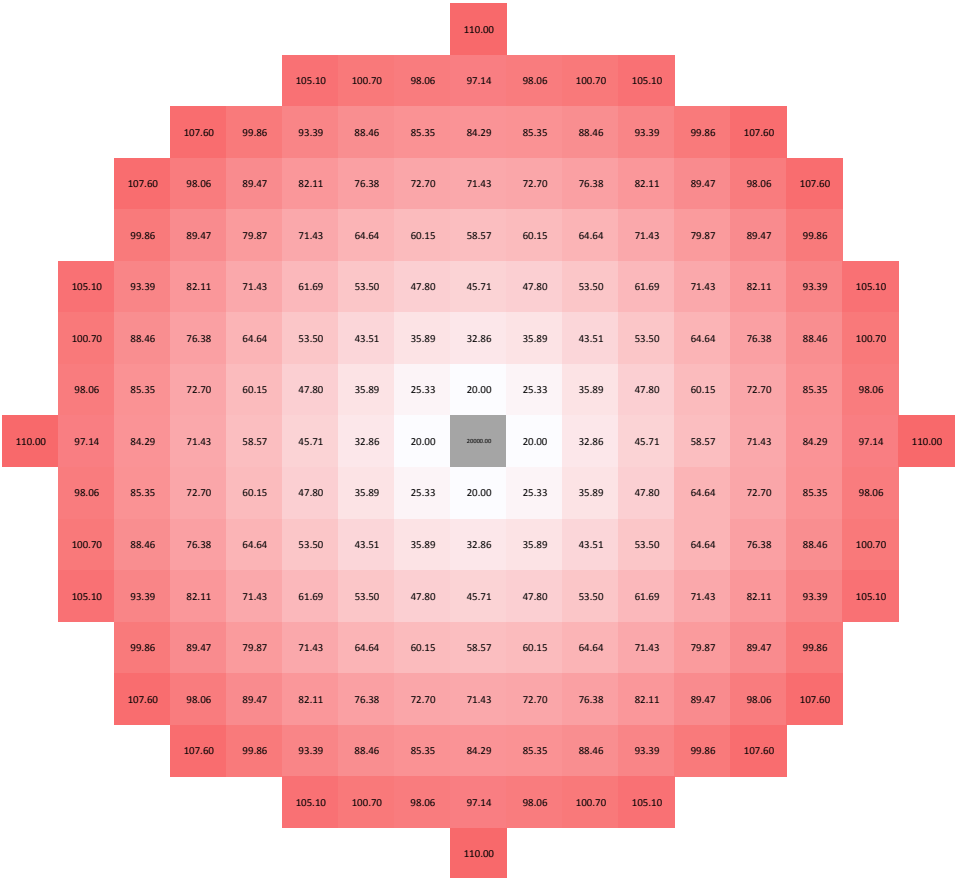
Industrial to RM, RS, OR

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	9.83
200	2	16.67
224	2.24	19.42
283	2.83	26.33
300	3	28.33
316	3.16	30.23
361	3.61	35.40
400	4	40.00
412	4.12	40.31
424	4.24	40.61
447	4.47	41.18
500	5	42.50
510	5.1	42.75
539	5.39	43.46
566	5.66	44.14
583	5.83	44.58
600	6	45.00
608	6.08	45.21
632	6.32	45.81
640	6.4	46.01
671	6.71	46.77
700	7	47.50
707	7.07	47.68
721	7.21	48.03
728	7.28	48.20
762	7.62	49.04
781	7.81	49.53
800	8	50.00



Industrial to IN

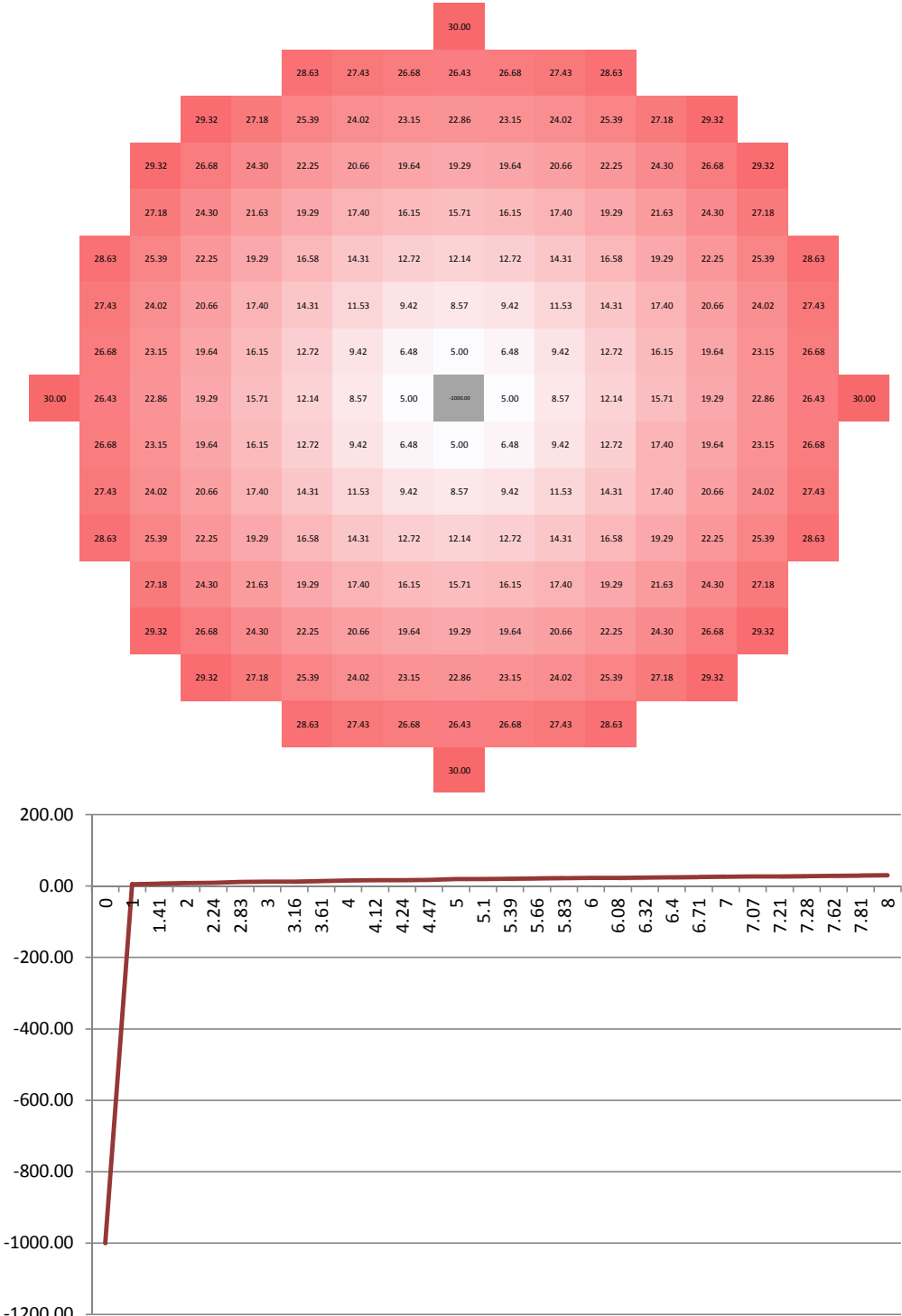
m	cells	weight
0	0	20000.00
100	1	20.00
141	1.41	25.33
200	2	32.86
224	2.24	35.89
283	2.83	43.51
300	3	45.71
316	3.16	47.80
361	3.61	53.50
400	4	58.57
412	4.12	60.15
424	4.24	61.69
447	4.47	64.64
500	5	71.43
510	5.1	72.70
539	5.39	76.38
566	5.66	79.87
583	5.83	82.11
600	6	84.29
608	6.08	85.35
632	6.32	88.46
640	6.4	89.47
671	6.71	93.39
700	7	97.14
707	7.07	98.06
721	7.21	99.86
728	7.28	100.70
762	7.62	105.10
781	7.81	107.60
800	8	110.00



* Valor 0-20000 no representado en gráfico

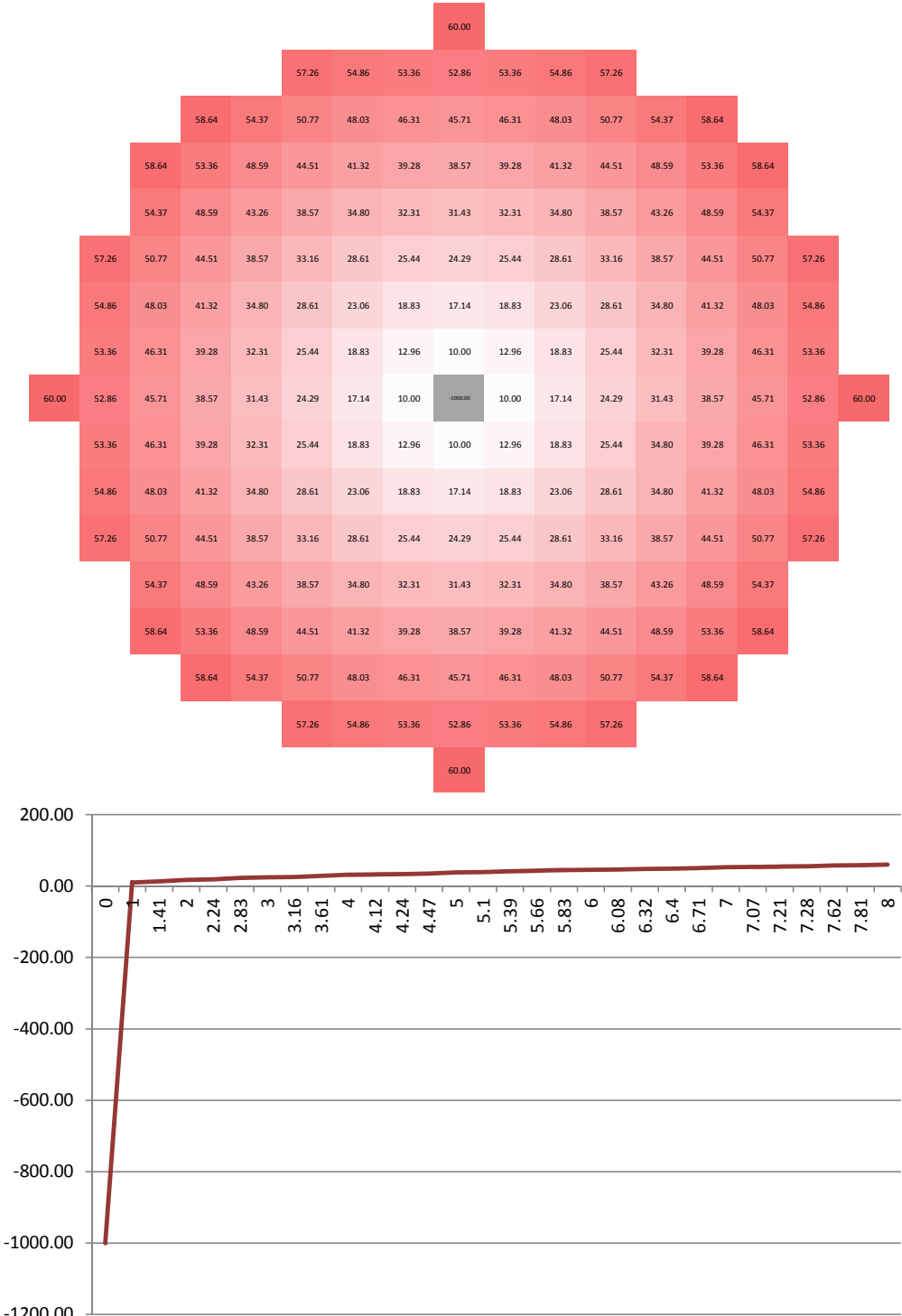
Industrial to FC*

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	6.48
200	2	8.57
224	2.24	9.42
283	2.83	11.53
300	3	12.14
316	3.16	12.72
361	3.61	14.31
400	4	15.71
412	4.12	16.15
424	4.24	16.58
447	4.47	17.40
500	5	19.29
510	5.1	19.64
539	5.39	20.66
566	5.66	21.63
583	5.83	22.25
600	6	22.86
608	6.08	23.15
632	6.32	24.02
640	6.4	24.30
671	6.71	25.39
700	7	26.43
707	7.07	26.68
721	7.21	27.18
728	7.28	27.43
762	7.62	28.63
781	7.81	29.32
800	8	30.00



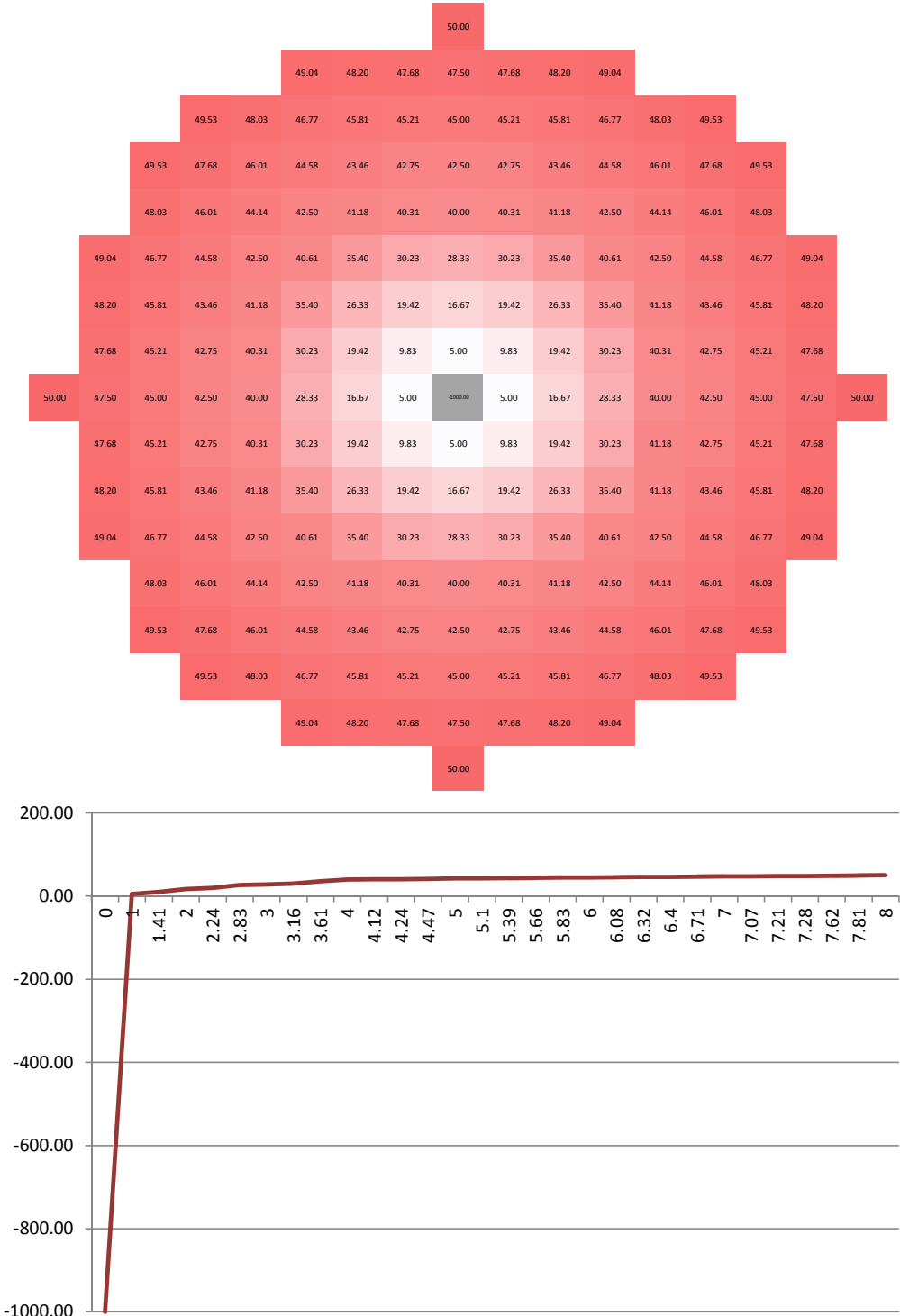
Industrial to UG*

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	10.00
141	1.41	12.96
200	2	17.14
224	2.24	18.83
283	2.83	23.06
300	3	24.29
316	3.16	25.44
361	3.61	28.61
400	4	31.43
412	4.12	32.31
424	4.24	33.16
447	4.47	34.80
500	5	38.57
510	5.1	39.28
539	5.39	41.32
566	5.66	43.26
583	5.83	44.51
600	6	45.71
608	6.08	46.31
632	6.32	48.03
640	6.4	48.59
671	6.71	50.77
700	7	52.86
707	7.07	53.36
721	7.21	54.37
728	7.28	54.86
762	7.62	57.26
781	7.81	58.64
800	8	60.00



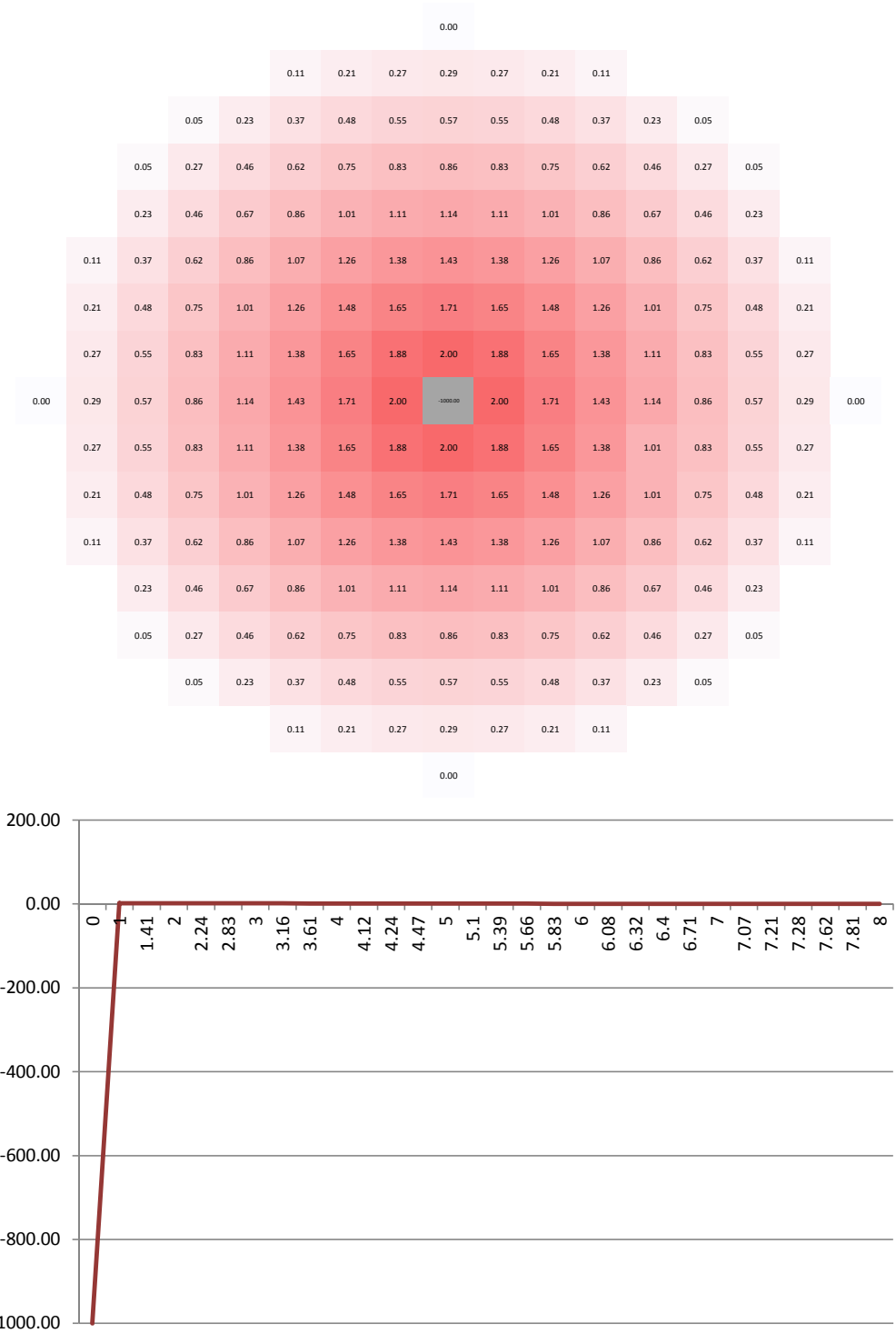
Facilities to IN, OR

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	9.83
200	2	16.67
224	2.24	19.42
283	2.83	26.33
300	3	28.33
316	3.16	30.23
361	3.61	35.40
400	4	40.00
412	4.12	40.31
424	4.24	40.61
447	4.47	41.18
500	5	42.50
510	5.1	42.75
539	5.39	43.46
566	5.66	44.14
583	5.83	44.58
600	6	45.00
608	6.08	45.21
632	6.32	45.81
640	6.4	46.01
671	6.71	46.77
700	7	47.50
707	7.07	47.68
721	7.21	48.03
728	7.28	48.20
762	7.62	49.04
781	7.81	49.53
800	8	50.00



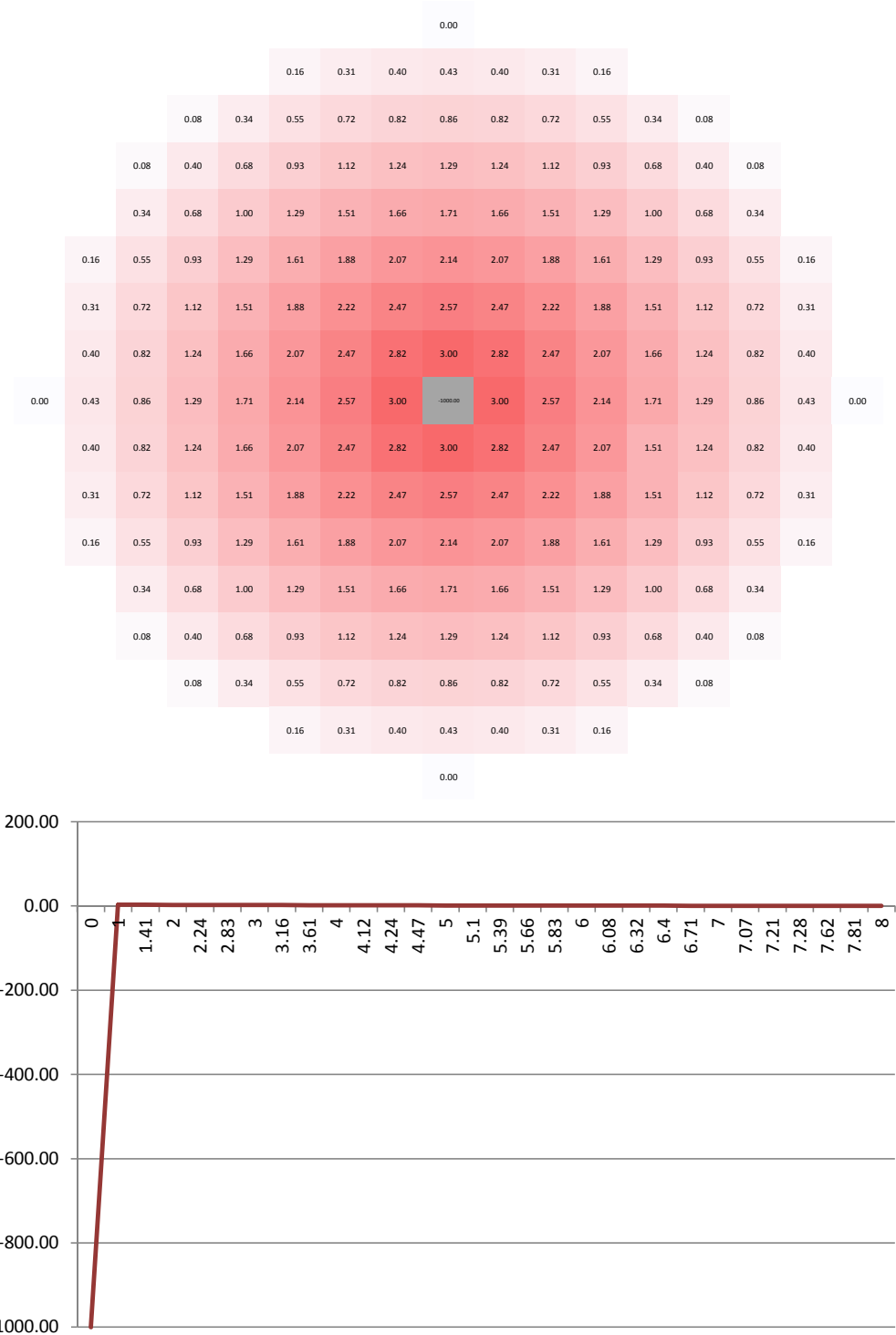
Facilities to RM

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	2.00
141	1.41	1.88
200	2	1.71
224	2.24	1.65
283	2.83	1.48
300	3	1.43
316	3.16	1.38
361	3.61	1.26
400	4	1.14
412	4.12	1.11
424	4.24	1.07
447	4.47	1.01
500	5	0.86
510	5.1	0.83
539	5.39	0.75
566	5.66	0.67
583	5.83	0.62
600	6	0.57
608	6.08	0.55
632	6.32	0.48
640	6.4	0.46
671	6.71	0.37
700	7	0.29
707	7.07	0.27
721	7.21	0.23
728	7.28	0.21
762	7.62	0.11
781	7.81	0.05
800	8	0.00



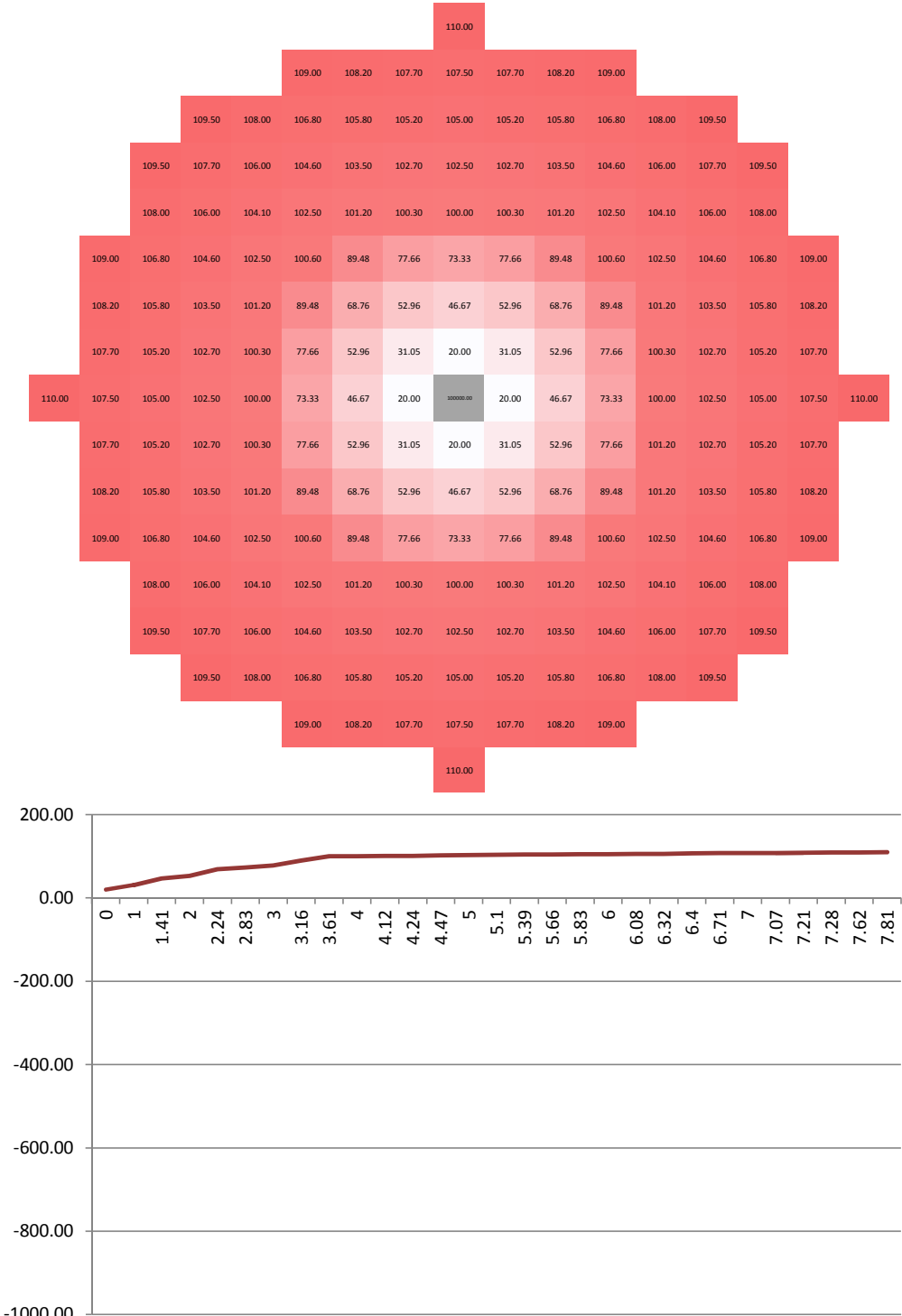
Facilities to RS

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	3.00
141	1.41	2.82
200	2	2.57
224	2.24	2.47
283	2.83	2.22
300	3	2.14
316	3.16	2.07
361	3.61	1.88
400	4	1.71
412	4.12	1.66
424	4.24	1.61
447	4.47	1.51
500	5	1.29
510	5.1	1.24
539	5.39	1.12
566	5.66	1.00
583	5.83	0.93
600	6	0.86
608	6.08	0.82
632	6.32	0.72
640	6.4	0.68
671	6.71	0.55
700	7	0.43
707	7.07	0.40
721	7.21	0.34
728	7.28	0.31
762	7.62	0.16
781	7.81	0.08
800	8	0.00



Facilities to FC*

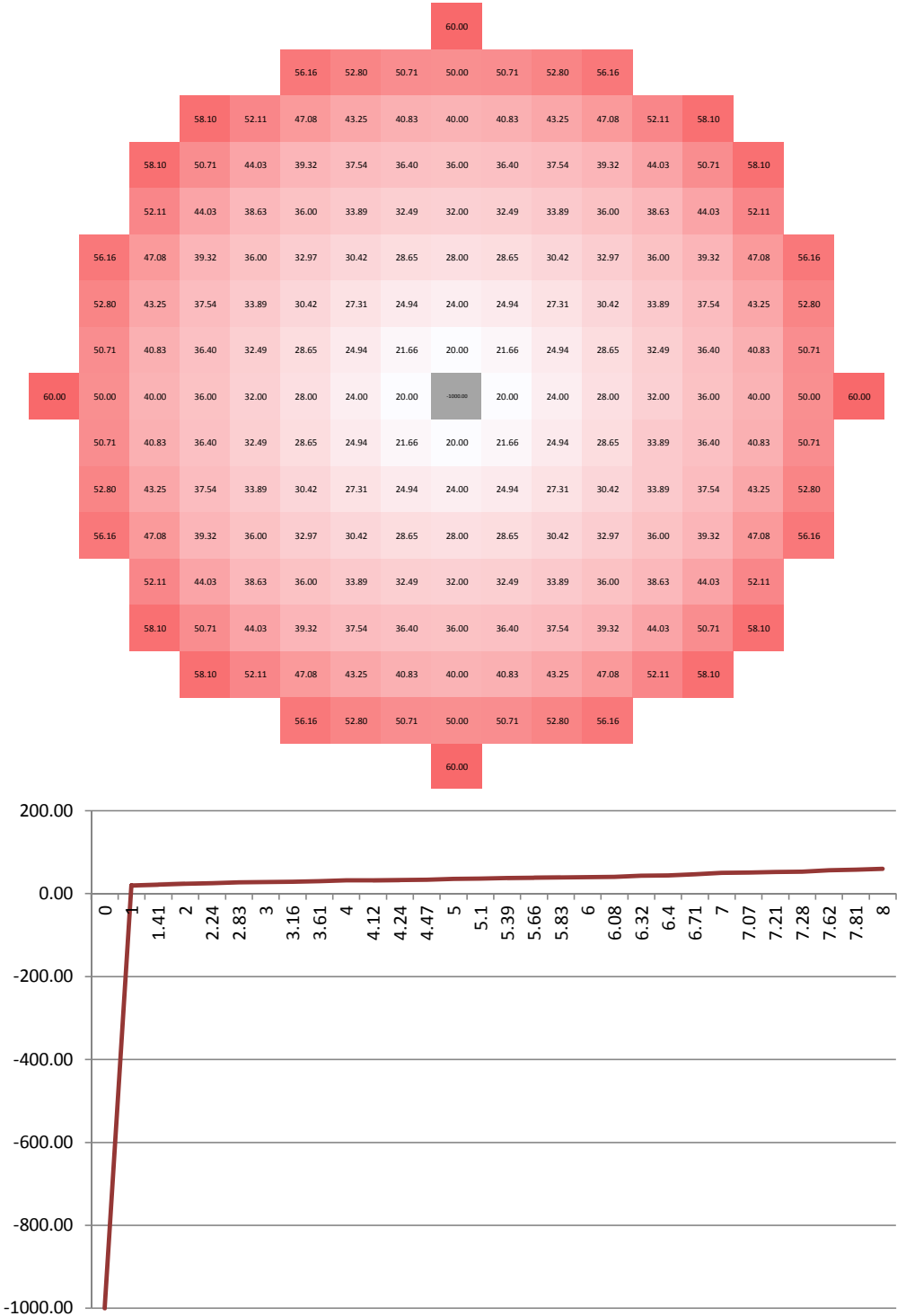
m	cells	weight
0	0	100000.00
100	1	20.00
141	1.41	31.05
200	2	46.67
224	2.24	52.96
283	2.83	68.76
300	3	73.33
316	3.16	77.66
361	3.61	89.48
400	4	100.00
412	4.12	100.30
424	4.24	100.60
447	4.47	101.20
500	5	102.50
510	5.1	102.70
539	5.39	103.50
566	5.66	104.10
583	5.83	104.60
600	6	105.00
608	6.08	105.20
632	6.32	105.80
640	6.4	106.00
671	6.71	106.80
700	7	107.50
707	7.07	107.70
721	7.21	108.00
728	7.28	108.20
762	7.62	109.00
781	7.81	109.50
800	8	110.00



* Valor 0-100000 no representado en gráfico

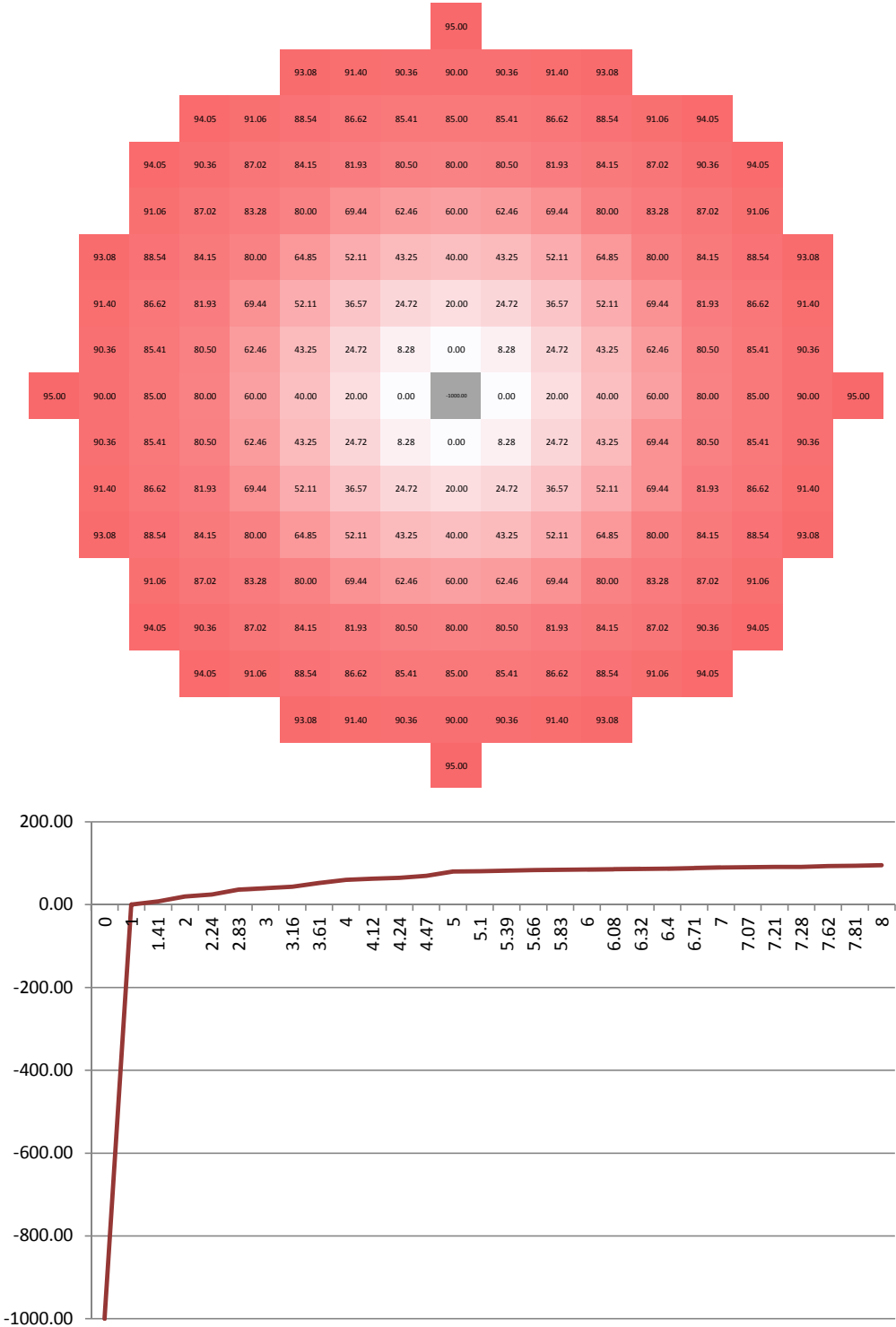
Facilities to UG

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	20.00
141	1.41	21.66
200	2	24.00
224	2.24	24.94
283	2.83	27.31
300	3	28.00
316	3.16	28.65
361	3.61	30.42
400	4	32.00
412	4.12	32.49
424	4.24	32.97
447	4.47	33.89
500	5	36.00
510	5.1	36.40
539	5.39	37.54
566	5.66	38.63
583	5.83	39.32
600	6	40.00
608	6.08	40.83
632	6.32	43.25
640	6.4	44.03
671	6.71	47.08
700	7	50.00
707	7.07	50.71
721	7.21	52.11
728	7.28	52.80
762	7.62	56.16
781	7.81	58.10
800	8	60.00



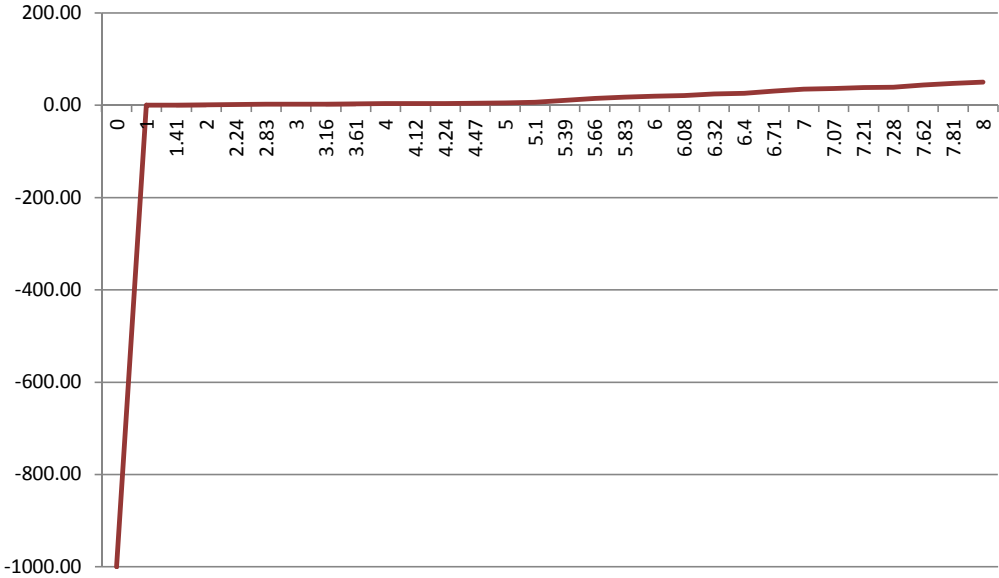
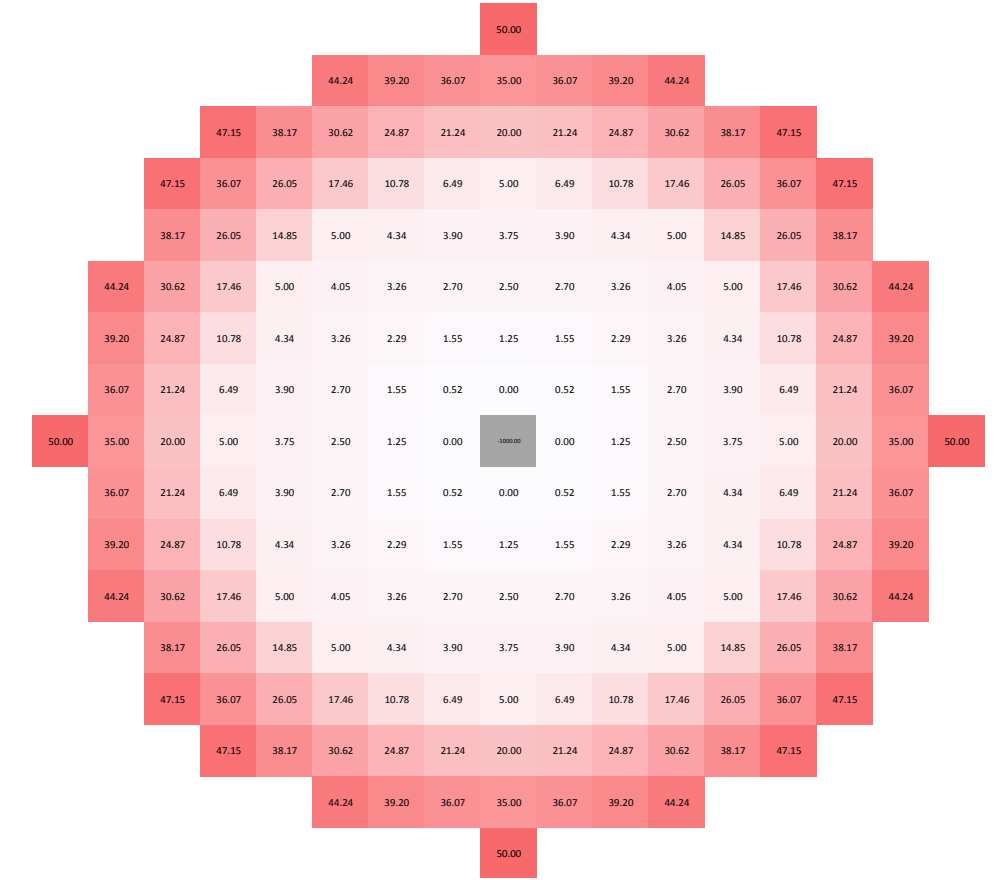
Office and Retail to RM, UG

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	0.00
141	1.41	8.28
200	2	20.00
224	2.24	24.72
283	2.83	36.57
300	3	40.00
316	3.16	43.25
361	3.61	52.11
400	4	60.00
412	4.12	62.46
424	4.24	64.85
447	4.47	69.44
500	5	80.00
510	5.1	80.50
539	5.39	81.93
566	5.66	83.28
583	5.83	84.15
600	6	85.00
608	6.08	85.41
632	6.32	86.62
640	6.4	87.02
671	6.71	88.54
700	7	90.00
707	7.07	90.36
721	7.21	91.06
728	7.28	91.40
762	7.62	93.08
781	7.81	94.05
800	8	95.00



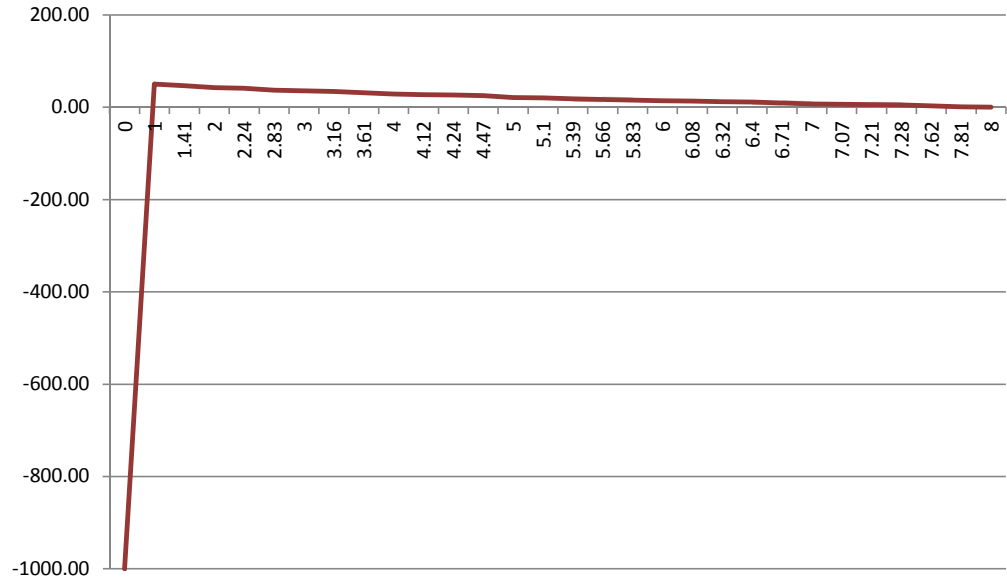
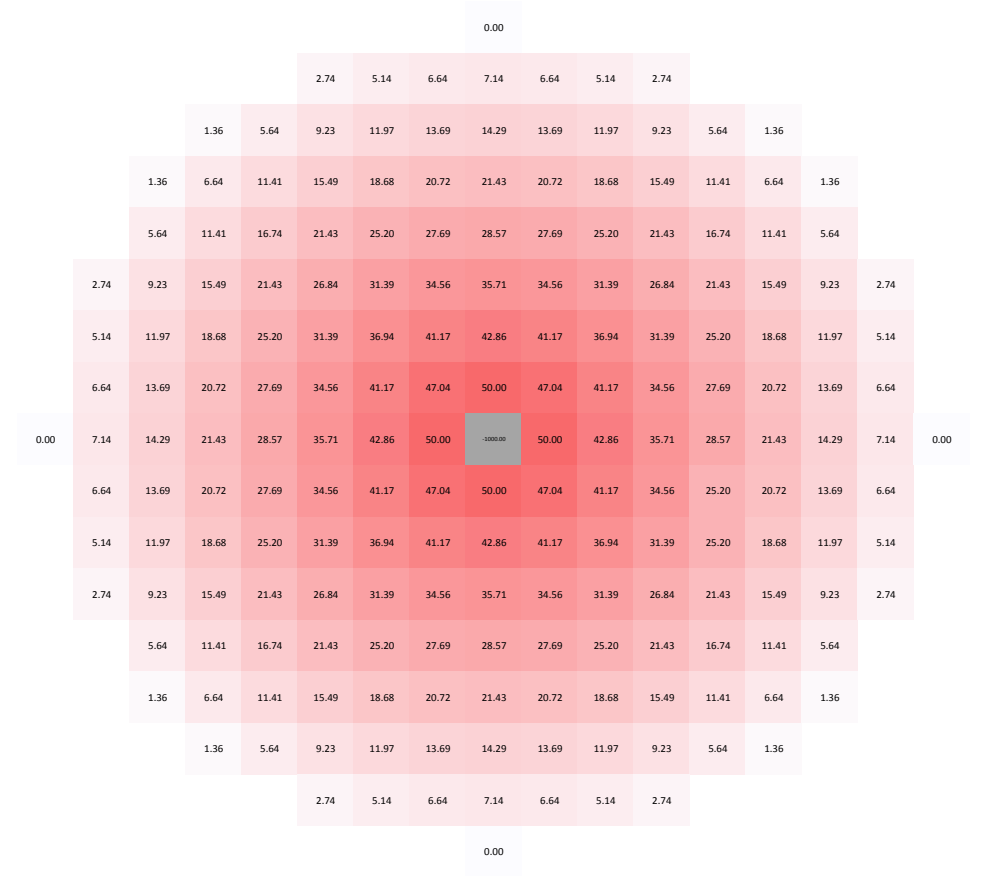
Office and Retail to RS

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	0.00
141	1.41	0.52
200	2	1.25
224	2.24	1.55
283	2.83	2.29
300	3	2.50
316	3.16	2.70
361	3.61	3.26
400	4	3.75
412	4.12	3.90
424	4.24	4.05
447	4.47	4.34
500	5	5.00
510	5.1	6.49
539	5.39	10.78
566	5.66	14.85
583	5.83	17.46
600	6	20.00
608	6.08	21.24
632	6.32	24.87
640	6.4	26.05
671	6.71	30.62
700	7	35.00
707	7.07	36.07
721	7.21	38.17
728	7.28	39.20
762	7.62	44.24
781	7.81	47.15
800	8	50.00



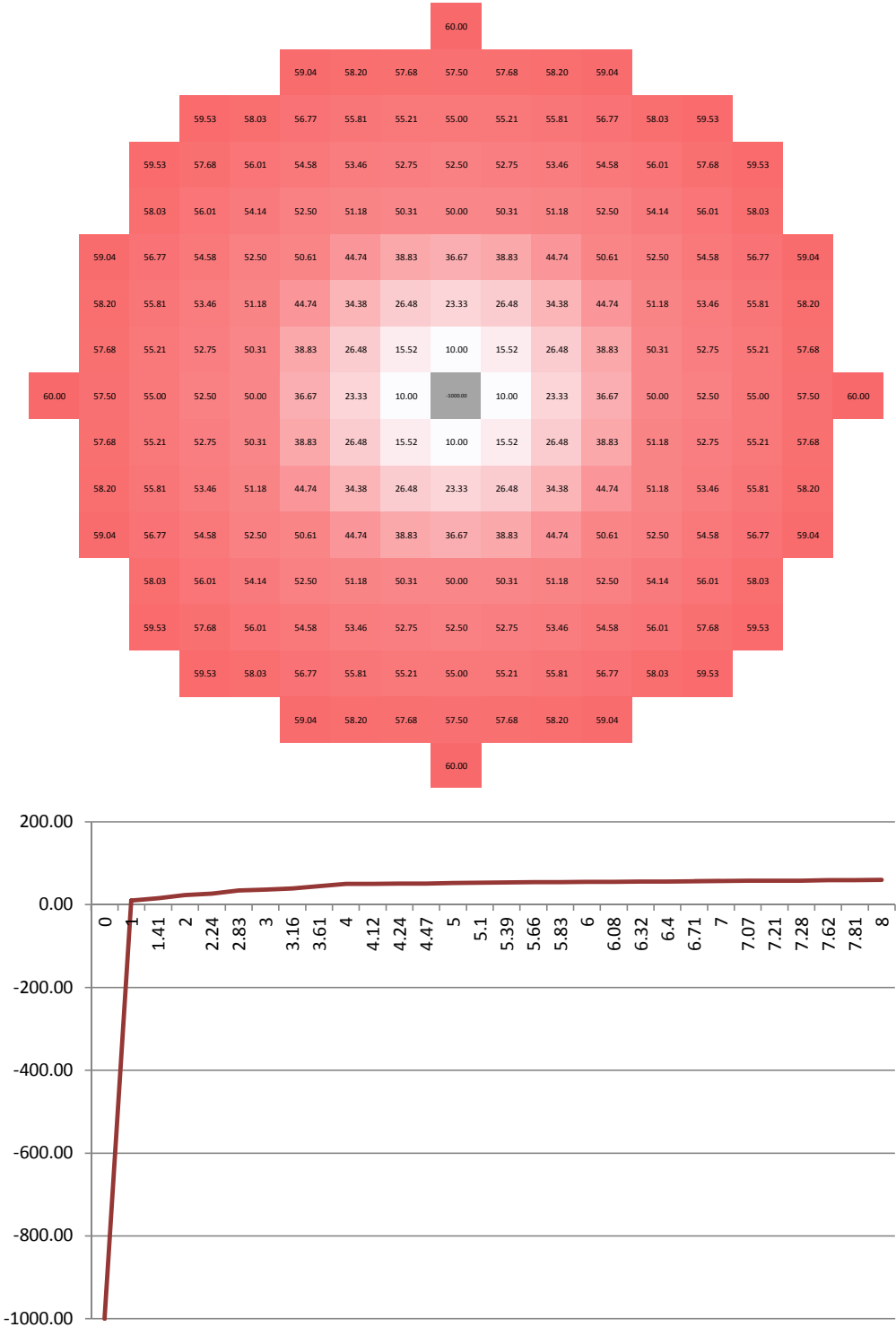
Office and Retail to IN

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	50.00
141	1.41	47.04
200	2	42.86
224	2.24	41.17
283	2.83	36.94
300	3	35.71
316	3.16	34.56
361	3.61	31.39
400	4	28.57
412	4.12	27.69
424	4.24	26.84
447	4.47	25.20
500	5	21.43
510	5.1	20.72
539	5.39	18.68
566	5.66	16.74
583	5.83	15.49
600	6	14.29
608	6.08	13.69
632	6.32	11.97
640	6.4	11.41
671	6.71	9.23
700	7	7.14
707	7.07	6.64
721	7.21	5.64
728	7.28	5.14
762	7.62	2.74
781	7.81	1.36
800	8	0.00



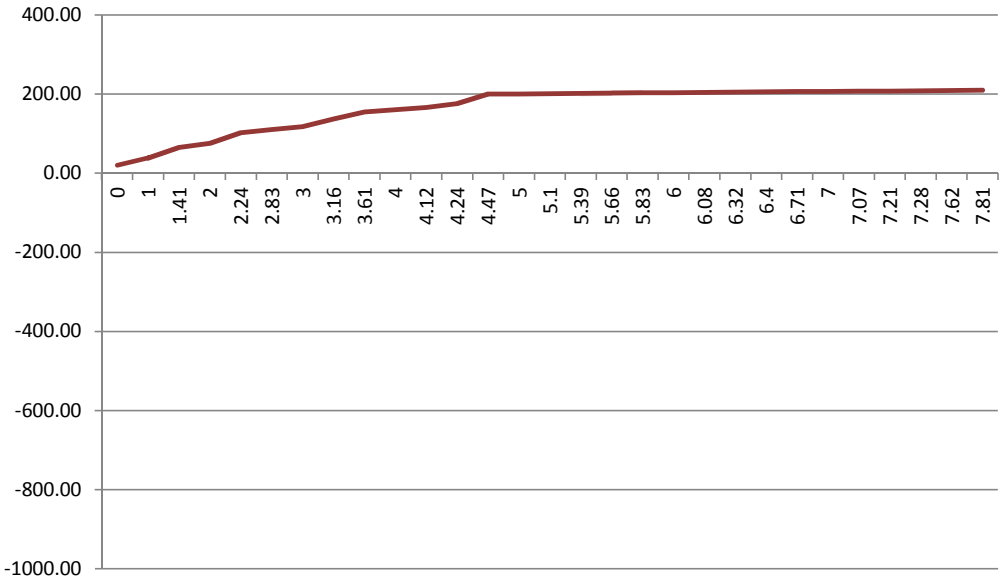
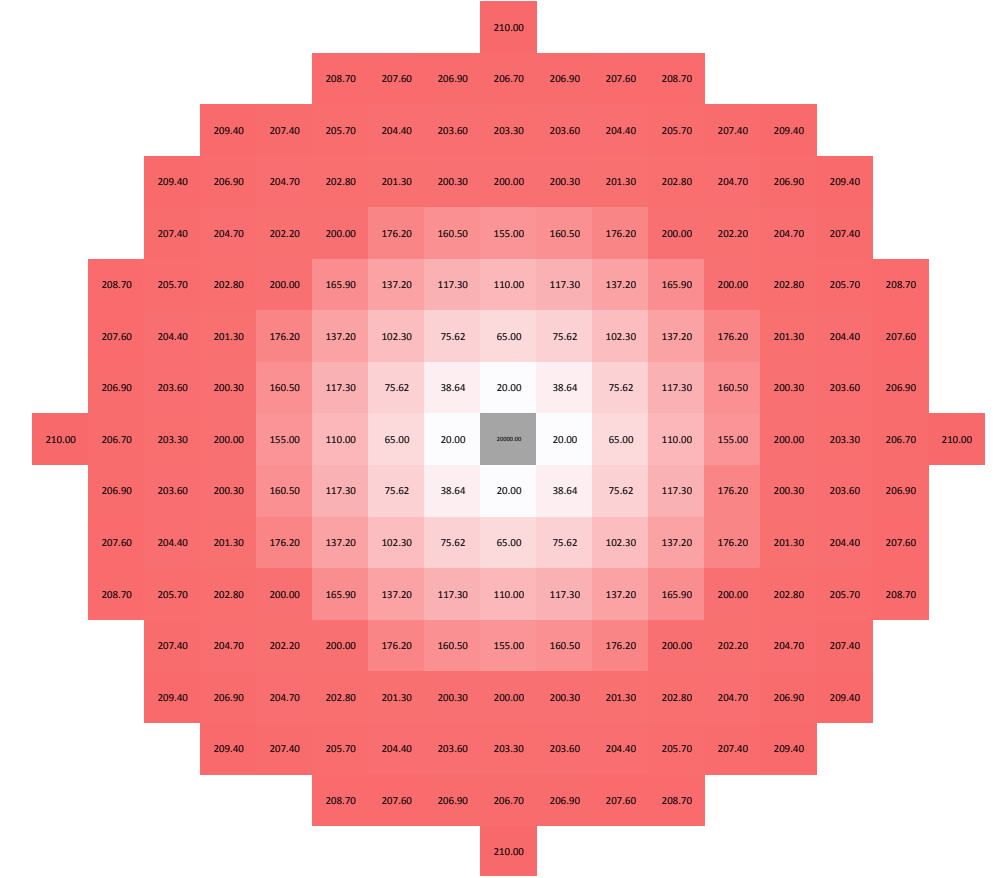
Office and Retail to FC

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	10.00
141	1.41	15.52
200	2	23.33
224	2.24	26.48
283	2.83	34.38
300	3	36.67
316	3.16	38.83
361	3.61	44.74
400	4	50.00
412	4.12	50.31
424	4.24	50.61
447	4.47	51.18
500	5	52.50
510	5.1	52.75
539	5.39	53.46
566	5.66	54.14
583	5.83	54.58
600	6	55.00
608	6.08	55.21
632	6.32	55.81
640	6.4	56.01
671	6.71	56.77
700	7	57.50
707	7.07	57.68
721	7.21	58.03
728	7.28	58.20
762	7.62	59.04
781	7.81	59.53
800	8	60.00



Office and Retail to OR*

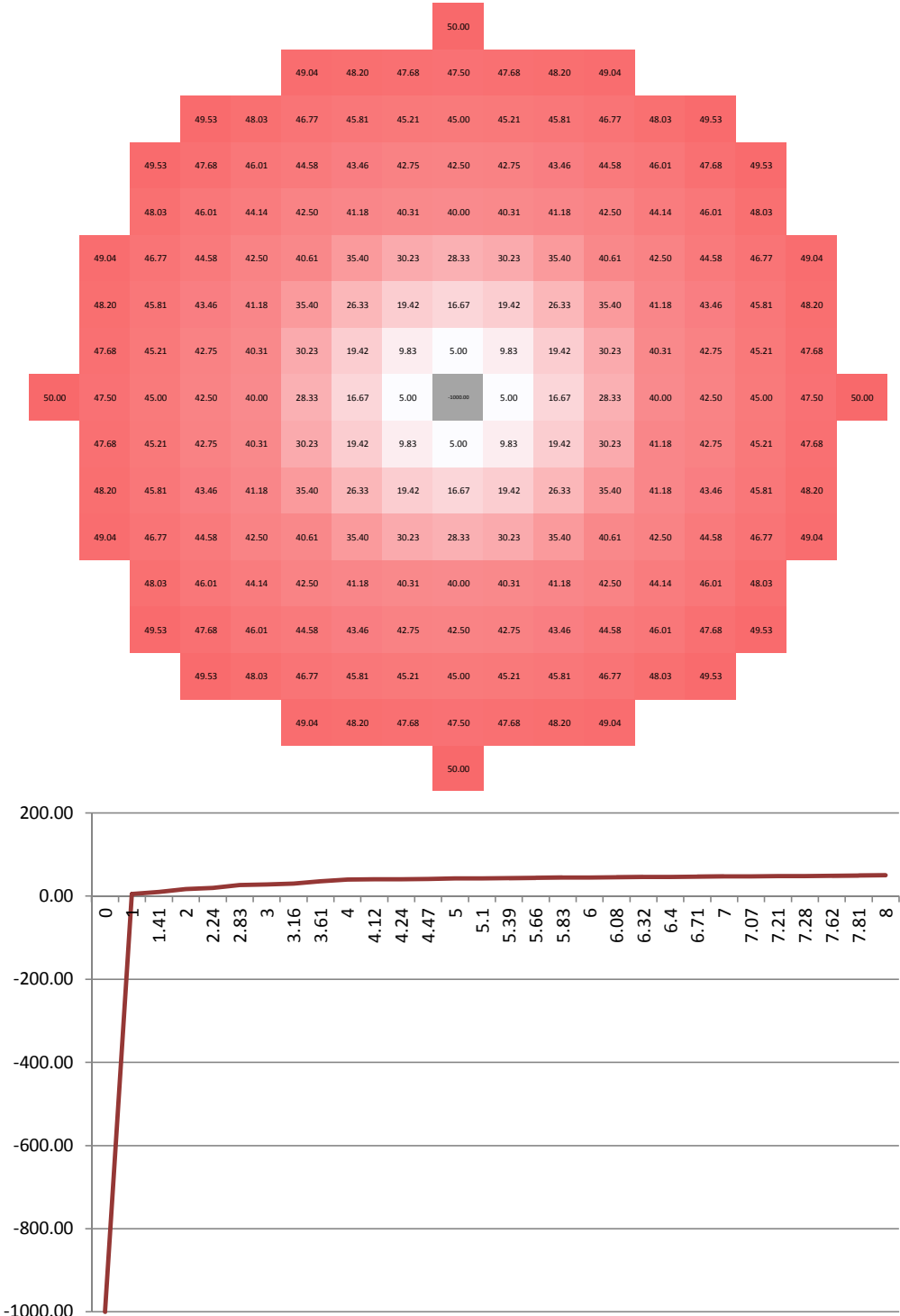
m	cells	weight
0	0	20000.00
100	1	20.00
141	1.41	38.64
200	2	65.00
224	2.24	75.62
283	2.83	102.30
300	3	110.00
316	3.16	117.30
361	3.61	137.20
400	4	155.00
412	4.12	160.50
424	4.24	165.90
447	4.47	176.20
500	5	200.00
510	5.1	200.30
539	5.39	201.30
566	5.66	202.20
583	5.83	202.80
600	6	203.30
608	6.08	203.60
632	6.32	204.40
640	6.4	204.70
671	6.71	205.70
700	7	206.70
707	7.07	206.90
721	7.21	207.40
728	7.28	207.60
762	7.62	208.70
781	7.81	209.40
800	8	210.00



* Valor 0-20000 no representado en gráfico

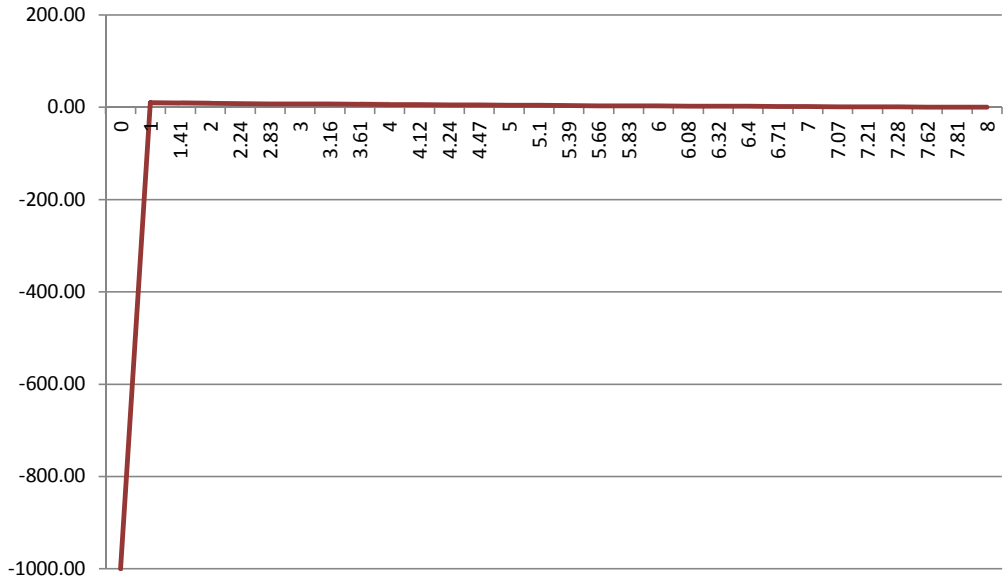
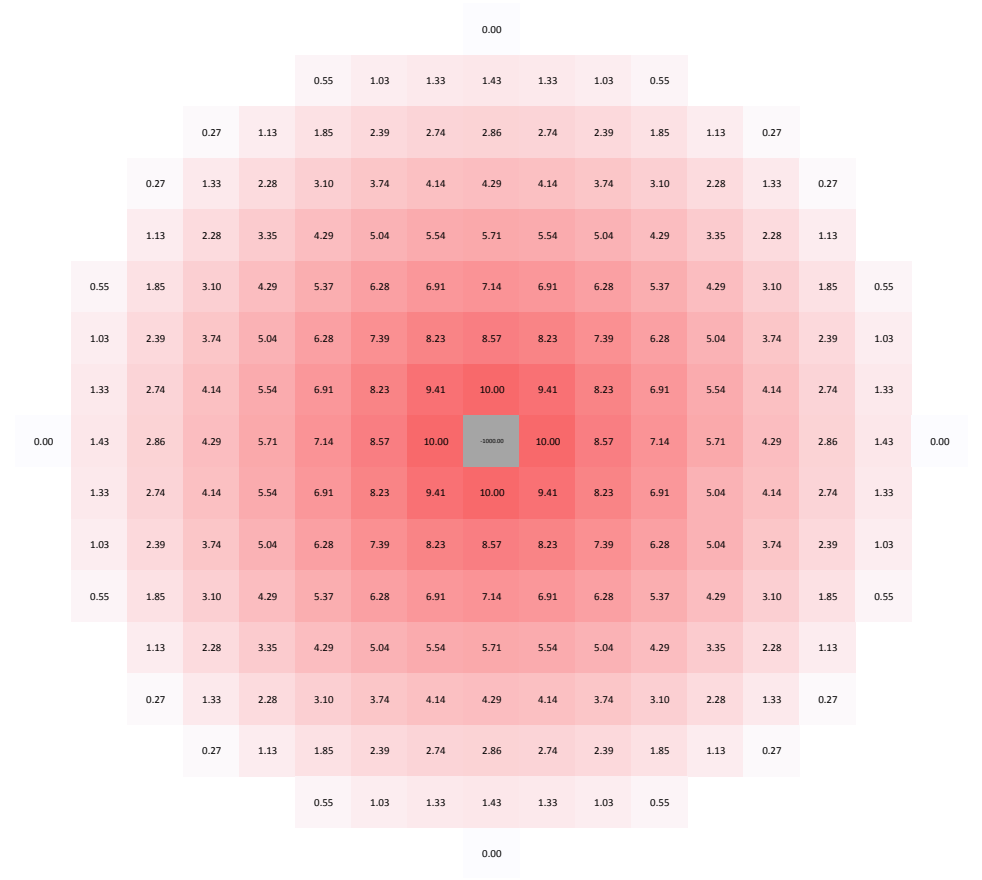
Urban Green to IN

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	9.83
200	2	16.67
224	2.24	19.42
283	2.83	26.33
300	3	28.33
316	3.16	30.23
361	3.61	35.40
400	4	40.00
412	4.12	40.31
424	4.24	40.61
447	4.47	41.18
500	5	42.50
510	5.1	42.75
539	5.39	43.46
566	5.66	44.14
583	5.83	44.58
600	6	45.00
608	6.08	45.21
632	6.32	45.81
640	6.4	46.01
671	6.71	46.77
700	7	47.50
707	7.07	47.68
721	7.21	48.03
728	7.28	48.20
762	7.62	49.04
781	7.81	49.53
800	8	50.00



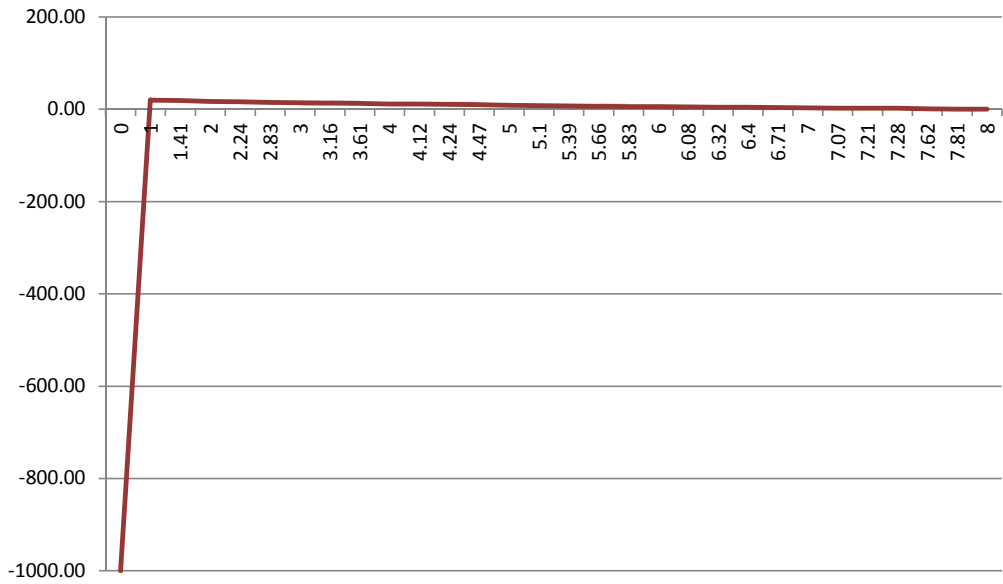
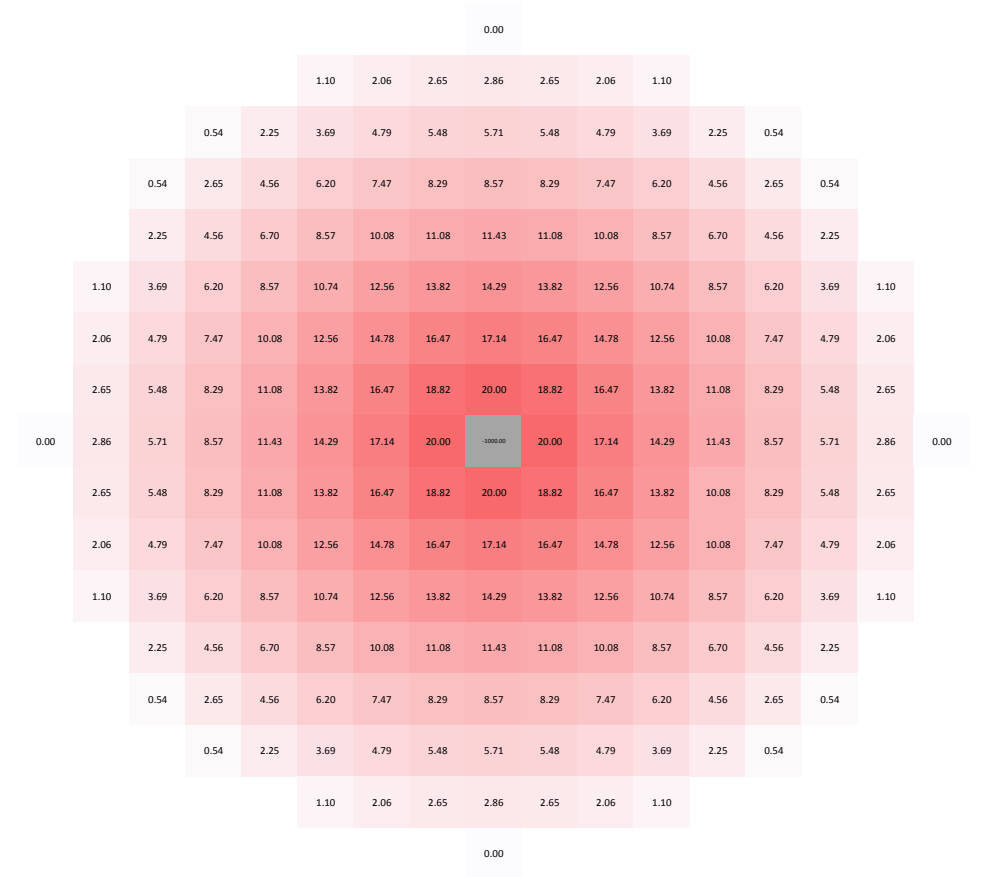
Urban Green to IN

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	10.00
141	1.41	9.41
200	2	8.57
224	2.24	8.23
283	2.83	7.39
300	3	7.14
316	3.16	6.91
361	3.61	6.28
400	4	5.71
412	4.12	5.54
424	4.24	5.37
447	4.47	5.04
500	5	4.29
510	5.1	4.14
539	5.39	3.74
566	5.66	3.35
583	5.83	3.10
600	6	2.86
608	6.08	2.74
632	6.32	2.39
640	6.4	2.28
671	6.71	1.85
700	7	1.43
707	7.07	1.33
721	7.21	1.13
728	7.28	1.03
762	7.62	0.55
781	7.81	0.27
800	8	0.00



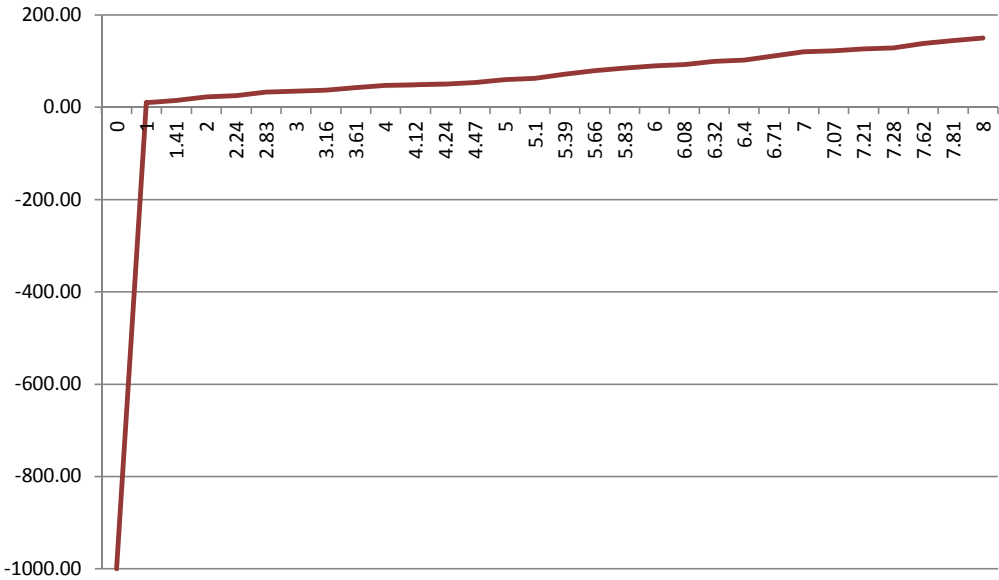
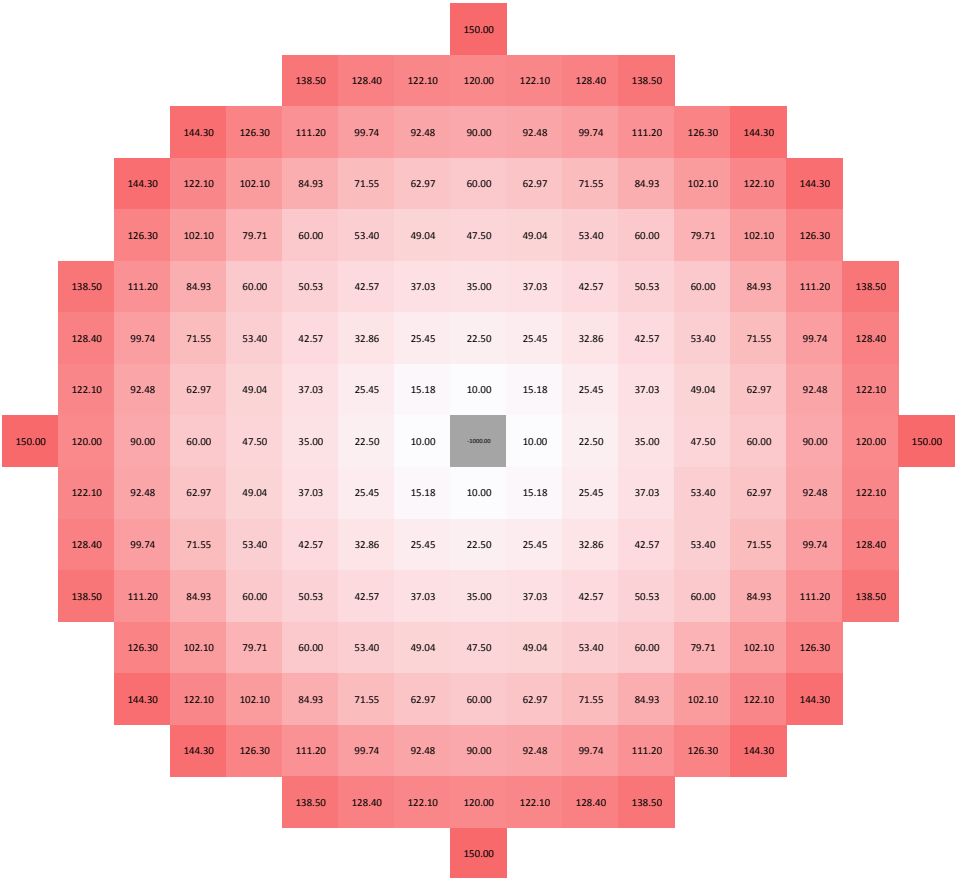
Urban Green to RS

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	20.00
141	1.41	18.82
200	2	17.14
224	2.24	16.47
283	2.83	14.78
300	3	14.29
316	3.16	13.82
361	3.61	12.56
400	4	11.43
412	4.12	11.08
424	4.24	10.74
447	4.47	10.08
500	5	8.57
510	5.1	8.29
539	5.39	7.47
566	5.66	6.70
583	5.83	6.20
600	6	5.71
608	6.08	5.48
632	6.32	4.79
640	6.4	4.56
671	6.71	3.69
700	7	2.86
707	7.07	2.65
721	7.21	2.25
728	7.28	2.06
762	7.62	1.10
781	7.81	0.54
800	8	0.00



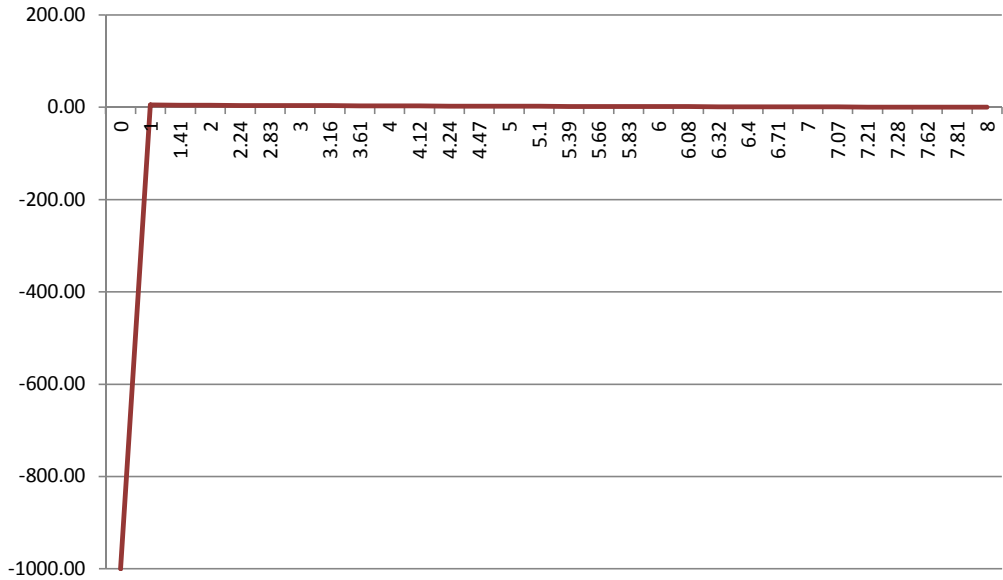
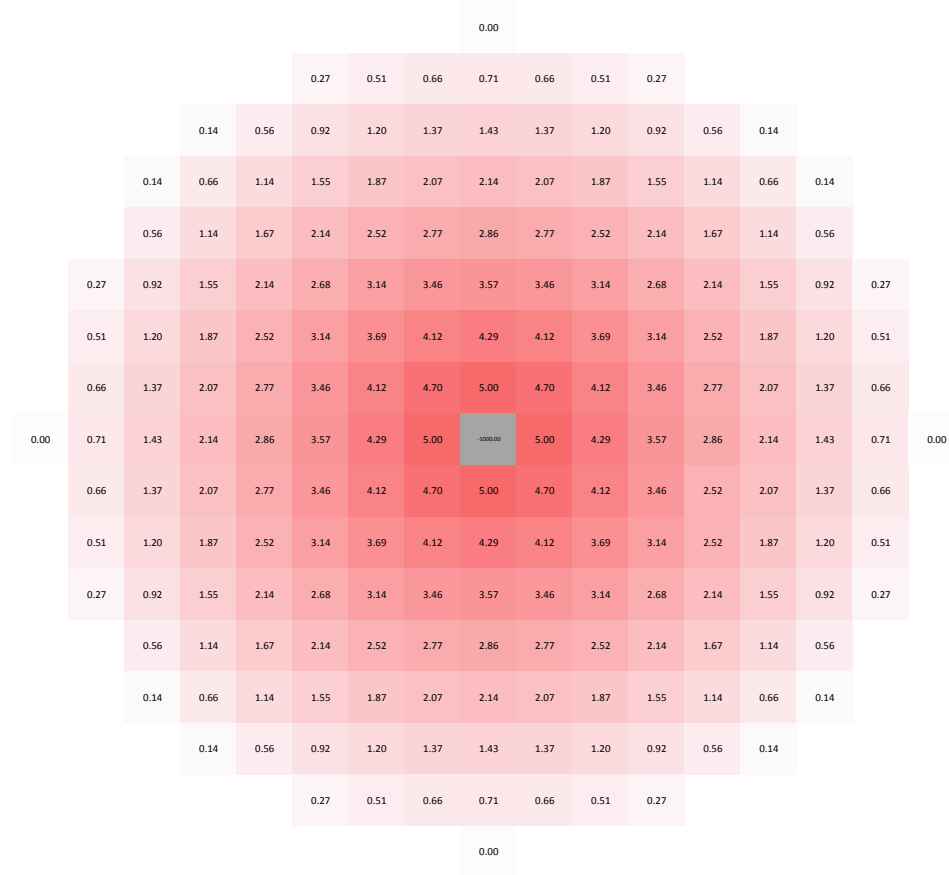
Urban Green to FC

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	10.00
141	1.41	15.18
200	2	22.50
224	2.24	25.45
283	2.83	32.86
300	3	35.00
316	3.16	37.03
361	3.61	42.57
400	4	47.50
412	4.12	49.04
424	4.24	50.53
447	4.47	53.40
500	5	60.00
510	5.1	62.97
539	5.39	71.55
566	5.66	79.71
583	5.83	84.93
600	6	90.00
608	6.08	92.48
632	6.32	99.74
640	6.4	102.10
671	6.71	111.20
700	7	120.00
707	7.07	122.10
721	7.21	126.30
728	7.28	128.40
762	7.62	138.50
781	7.81	144.30
800	8	150.00



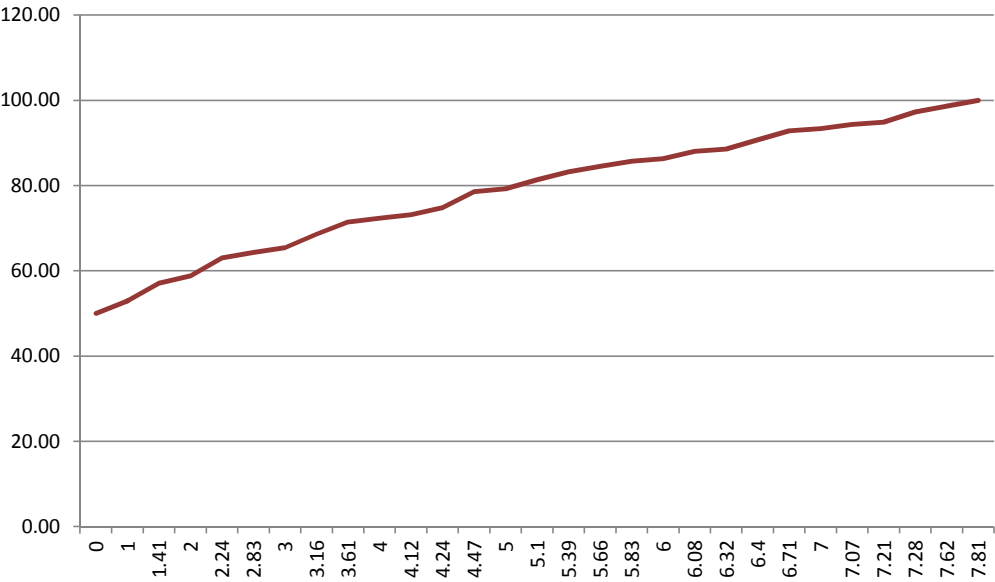
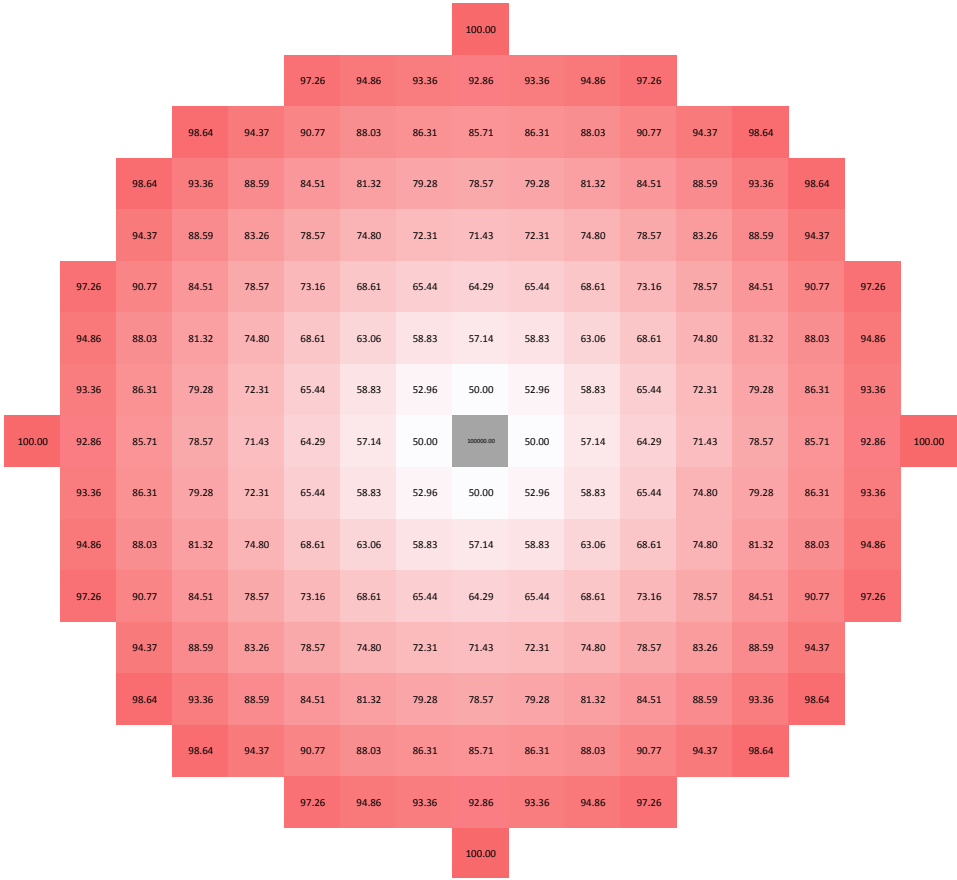
Urban Green to OR

m	cells	weight
0	0	-1000.00
100	1	5.00
141	1.41	4.70
200	2	4.29
224	2.24	4.12
283	2.83	3.69
300	3	3.57
316	3.16	3.46
361	3.61	3.14
400	4	2.86
412	4.12	2.77
424	4.24	2.68
447	4.47	2.52
500	5	2.14
510	5.1	2.07
539	5.39	1.87
566	5.66	1.67
583	5.83	1.55
600	6	1.43
608	6.08	1.37
632	6.32	1.20
640	6.4	1.14
671	6.71	0.92
700	7	0.71
707	7.07	0.66
721	7.21	0.56
728	7.28	0.51
762	7.62	0.27
781	7.81	0.14
800	8	0.00



Urban Green to UG

m	cells	weight
0	0	100000.00
100	1	50.00
141	1.41	52.96
200	2	57.14
224	2.24	58.83
283	2.83	63.06
300	3	64.29
316	3.16	65.44
361	3.61	68.61
400	4	71.43
412	4.12	72.31
424	4.24	73.16
447	4.47	74.80
500	5	78.57
510	5.1	79.28
539	5.39	81.32
566	5.66	83.26
583	5.83	84.51
600	6	85.71
608	6.08	86.31
632	6.32	88.03
640	6.4	88.59
671	6.71	90.77
700	7	92.86
707	7.07	93.36
721	7.21	94.37
728	7.28	94.86
762	7.62	97.26
781	7.81	98.64
800	8	100.00



* Valor 0-100000 no representado en gráfico

Anexo 2. Síntesis General de la Investigación

CONTENIDO

1	SÍNTESIS GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.1	Resumen.....	2
1.2	Objetivos	2
1.2.1	Objetivo general	2
1.2.2	Objetivos específicos	3
1.2.3	Conclusiones respecto a las preguntas de investigación	3
1.2.4	Conclusión general	5
2	GENERAL RESEARCH SYNTHESIS	7
2.1	Abstract.....	7
2.2	Objectives	7
2.2.1	General objective	7
2.2.2	Specific objectives	8
2.3	Conclusions with regard to the research questions	8
2.4	General conclusions	10

1 SÍNTESIS GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1 Resumen

Los modelos geográficos y dinámicos de cambio de usos del suelo han tenido un desarrollo innegable unido al perfeccionamiento de las bases de datos y los programas informáticos de tratamiento de la información espacial. En un principio, como en el mismo desarrollo de la informática, los modelos geográficos computacionales, basados en teorías positivistas y econométricas, comenzaron a operar de la mano de la estadística, la linealidad, el equilibrio y el reduccionismo. Posteriormente, y también unido al modo en que evolucionaba la programación informática y los algoritmos adaptativos, los modelos geográficos comienzan a introducir la teoría de la complejidad para el estudio de los sistemas dinámicos no lineales, lejos del equilibrio y emergentes.

Las ciudades observadas como artefactos humanos cargados de intencionalidad (sobre todo en las ciudades modernas), emergen sin embargo, fruto de la interacción de multitud de elementos, expresando auto-organización. Aún cuando su desarrollo se efectúa bajo directrices de planificación, la ciudad surge y se desarrolla bajo un cúmulo de decisiones colectivas, políticas, intervenciones, gobiernos, departamentos de planificación y administración, para satisfacer multitud de carencias y deseos. Además las ciudades son el mejor ejemplo de sistema humano social dinámico y adaptativo, capaz de responder a cualquier perturbación externa o interna a través de multitud de transformaciones observadas en su comportamiento macroscópico surgido de multitud de interacciones locales.

Los cambios de usos de suelo urbano son uno de los efectos de la evolución adaptativa de las ciudades que se manifiestan localmente y reflejan el tipo de desarrollo y las transformaciones que tienen lugar en un área metropolitana. La dinámica de cambio de usos de suelo urbano puede ser tratada como un sistema complejo y mostrada en modelos simples geográficos basados en autómatas celulares.

En este trabajo se valoran las posibilidades de aplicación de este tipo de modelo dinámica en regiones urbanas mediterráneas tomando el caso de la Comunidad de Madrid como área de estudio. Al mismo tiempo, se pretende analizar la sensibilidad de estos modelos a los cambios de escala-resolución.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Evaluar el uso de herramientas para el modelado dinámico de cambio de usos de suelo urbano basado en autómatas celulares (MDUAC). 1) valorar sus posibilidades de

aplicación en regiones metropolitanas mediterráneas 2) analizar la sensibilidad de estos modelos a los cambios de escala-resolución.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Establecer un marco teórico sobre estudio de los usos del suelo en las áreas urbanas, dentro del marco de los sistemas complejos y la aplicación de modelos dinámicos de cambio de usos de suelo basados en autómatas celulares.
2. Elaborar una base de datos (bbdd) geográfica en la Comunidad de Madrid, enfocada sobre los usos de suelo urbanos y con diferentes escenarios temporales.
3. Evaluar la bdd desarrollada frente a CORINE Land Cover.
4. Realizar un análisis de los cambios de usos de suelo en la región metropolitana de Madrid (Comunidad Autónoma) entre los periodos 2000-2006-2009.
5. Calibrar y validar un modelo de simulación de cambio de usos de suelo basado en autómatas celulares y aplicado a la Comunidad de Madrid a partir de la bdd desarrollada y los tres estadios temporales considerados.
6. Evaluar la sensibilidad del modelo de simulación de cambio de usos de suelo basado en autómatas celulares a los cambios en la escala empleada.
7. Evaluar los métodos de agregación de información de uso más comúnmente utilizados en modelos de cambio de usos de suelo urbano.
8. Valorar otras técnicas de modelización espacio-temporal como el uso de redes neuronales artificiales y explorar su posible combinación con los modelos de simulación urbana basados en autómatas celulares.

1.2.3 Conclusiones respecto a las preguntas de investigación

¿Cuáles son los aspectos a considerar en la aplicación de MDUAC en regiones urbanas mediterráneas como la de Madrid?

Al tratarse de una experiencia *ad-hoc* para la región de Madrid no se dan medidas de parámetros de comparación respecto a otras experiencias de calibración, no obstante, de las conclusiones extraídas de esta investigación se consideran los siguientes aspectos a tener en cuenta a la hora de desarrollar un MDUAC en regiones urbanas mediterráneas como la de Madrid:

- 1) Conocer el fondo teórico de los MDUAC.
- 2) Selección de la escala/resolución de trabajo.
- 3) Sistematización y orden en los trabajos de calibración.
- 4) Singularidad espacial de las normas de vecindad.

¿En qué medida puede mejorar la observación de los cambios de usos de suelo urbano contar con una base de datos de usos de suelo de detalle?

Los procesos de interpretación humana, como los llevados a cabo en este trabajo para identificar usos de suelo urbano y almacenarlos en una base de datos, continúan aún siendo necesarios a la hora de realizar clasificaciones sobre los usos de suelo urbano, en la medida en que los algoritmos no sean capaces de realizar clasificaciones automáticas de detalle sobre los diferentes usos del suelo urbano.

En este trabajo se ha evaluado la capacidad de CORINE Land Cover para analizar los cambios de usos de suelo urbano revelándose pérdidas de precisión superiores al 50% de error. En este sentido, se sugiere en este trabajo la utilización de otras fuentes de mayor detalle cuando se realizan análisis dinámicos de cambio de usos de suelo urbano en escalas locales y de detalle.

¿Cuáles han sido las pautas generales de transformación de la región metropolitana de Madrid, en cuanto a la ocupación por suelo urbano y su distribución, para la primera década del siglo XXI, y observadas a escala de detalle?

La región metropolitana de Madrid responde perfectamente a las mencionadas dinámicas de crecimiento durante estos periodos en términos cuantitativos. Esto se resume en altas tasas de crecimiento poblacional y ratios aún mayores de crecimiento de suelo urbano (artificial). Sin embargo, si bien en este sentido Madrid se sitúa en los primeros puestos del ranking de crecimiento de ciudades de la Unión Europea, este trabajo pone sobre todo el enfoque en el tipo de expansión urbana que se ha producido en la región metropolitana madrileña, en la distribución de los usos de suelo, la progresión espacial urbana fragmentada y en el tipo de modelo urbano que se ha acentuado durante los mencionados periodos de estudio (2000-2006, 2006-2009). En esta dirección, se señala para Madrid la consolidación de un "modelo híbrido", entre el crecimiento urbano disperso (sprawl) y el desarrollo de la ciudad compacta. Un fenómeno que Catalán et al., (2008) también han identificado para la región metropolitana de Barcelona.

¿Cuáles son las reglas de transición que definen los patrones de cambio de los usos de suelo urbano de la región de Madrid reconocidas a través del desarrollo de un MDUAC?

La definición de las reglas de transición que producen los patrones de cambio de usos de suelo en la región metropolitana de Madrid se encuentran contenidas en los parámetros de peso que están representando mayormente las interacciones de vecindad entre los usos de suelo. Éstas se expresan en un marco de competencia por la ocupación del espacio. El poder explicativo de los MDUAC se encuentra implícito en el funcionamiento de las simulaciones dinámicas y en los valores de los pesos, coeficientes y parámetros calculados empíricamente para la función de transición. Todos estos datos se encuentran recogidos en el Anexo I de este trabajo.

¿Qué efecto tiene el cambio de los factores de escala en un MDUAC urbano?

El experimento llevado a cabo en este trabajo concluye la no dependencia del modelo del factor de escala, cuestión que supone una interesante aportación en cuanto al desarrollo de este tipo de aplicaciones. En este sentido los resultados indican que una vez validado un modelo a cierta escala-resolución, si se aplican los mismos datos de entrada y parámetros, dentro de un rango razonable de acuerdo a la región cartográfica y el fenómeno representado, el modelo puede ser ejecutado con otra resolución, que deben esperarse valores de calibración similares a los de la aplicación original.

¿Existe la posibilidad de combinar los modelos basados en autómatas celulares, con otros modelos de carácter más predictivo, como los desarrollados bajo algoritmos de redes neuronales artificiales?

Las aplicaciones de RNA se mostraron extraordinariamente útiles para señalar la aptitud de un espacio para acoger un determinado uso de suelo futuro de acuerdo a sus patrones anteriores de localización. Este hecho, fue uno de los que impulsó el interés para el trabajo con estos prototipos en esta investigación. Ya que siendo la aptitud del suelo (conjunto de variables sociales, ambientales y económicas) uno de los factores que forman parte del MDUAC evaluado en este trabajo, las aplicaciones desarrolladas sugieren una posible integración de ambos modelos MDUAC-RNA.

1.2.4 Conclusión general

Tanto los modelos computacionales, como las herramientas informáticas para el tratamiento y análisis la de información geográfica, están suponiendo un importantísimo apoyo para la explicación de cualquier fenómeno espacial. Esto que en nuestros días ya comienza a ser un tópico, toma hoy mayor fuerza, de la mano del desarrollo de la ciencia de la complejidad, y de la capacidad de los ordenadores y los algoritmos para simular múltiples relaciones simples entre agentes que se distribuyen en el espacio, más

sencillos (usos de suelo) o más complicados (inmobiliarias, conductores, estudiantes, constructores...), conformando dinámicas complejas. En realidad, en muchos casos, como ha dicho O'Sullivan (2004), para la Geografía Humana, todos estos nuevos argumentos de la complejidad son nuevos nombres para viejas ideas. No obstante, aún en ese caso, este trabajo ha realizado una pequeña aportación más dentro de los esfuerzos para conectar la investigación geográfica con esta perspectiva de la complejidad a través de los MDUAC, si bien como en todos los esfuerzos de este tipo, las fuerzas se disipan en multitud de apéndices prácticos y metodológicos. En cualquier caso, todos ellos han girado en torno a las ciudades, los autómatas celulares y los sistemas complejos.

2 GENERAL RESEARCH SYNTHESIS

2.1 Abstract

The geographic land use dynamic models have experienced an undeniable development joint with the improvement of the databases and the software for the treatment of the spatial information. In principle, like on the software development, the computational geographic models started to be operative supported by the statistic, the linearity, the equilibrium and the reductionism, based on positivist and econometric theories. Later, and also together with the software programming evolution and the adaptive algorithms, the geographic models began to introduce the Complexity theory for studying the non linear dynamic systems, far of the equilibrium and emergent.

Despite the cities are observed as human artifacts full of intentionality (over all in the modern cities), they emerge resulting from the interaction of multiple elements, and embody self-organization. Even when its development is produced under planning, the city arises and expands under a lot of collective decisions, politic, policies, governments, land planning departments and administrative agencies, in order to satisfy many lacks and desires. Moreover, the cities are the best example of a human social dynamic and adaptive system, able to respond to any external or internal perturbation through a huge number of transformations that can be observed on their macroscopic behaviour arisen from a large number of local interactions.

The urban land use changes are one of visible effects of the adaptive evolution of the cities that have a local incidence and reveal the kind of development and the transformations on a metropolitan area. The urban land use change dynamic could be treated as complex system, showed on geographic simple models based on cellular automata.

This work assesses the possibilities of application of this kind of dynamic model on urban Mediterranean regions, taken the Community of Madrid as study area. By the way, it attempts to evaluate the sensitivity of these models to the scale-resolution.

2.2 Objectives

2.2.1 General objective

The principal aim of this research is to evaluate the use of tools for modelling dynamically the urban land use change based on cellular automata (MDUAC). 1) Assessing the possibilities of application in Mediterranean metropolitan regions; and 2) Analyzing the model sensitivity to the spatial resolution changes.

2.2.2 Specific objectives

1. To establish a theoretical framework about the study of the land use change in urban areas, within the complex systems field and the application of urban land use change dynamic models based on cellular automata.
2. To build a geodatabase for the Madrid's Autonomous Community, focused on the urban land uses and different time scenarios.
3. To evaluate the developed geodatabase using CORINE Land Cover as reference.
4. To develop a land use change analysis in the metropolitan region of Madrid (Autonomous Community) between 2000-2006-2009 periods.
5. To calibrate and validate a land use change simulation model based on cellular automata, applied to the Madrid Autonomous Community since the developed geodatabase and the three time periods considered.
6. To evaluate the sensitivity of the land use change simulation model based on cellular automata implementing changes in the employed spatial scale.
7. To evaluate the most commonly used methods for aggregation in urban land use change models.
8. To assess other spatial-temporal modelling techniques like using Artificial Neural Networks. Exploring its potential combination with urban simulation models based on cellular automata.

2.3 Conclusions with regard to the research questions

Which are the elements to consider on the application of MDUAC (Cellular Automata-based Land Use Change Dynamic Model) in Mediterranean urban regions like Madrid?

This is an *ad-hoc* experiment on the Madrid region; therefore it does not count with any kind of comparison parameters from other similar calibration experiments in the area. Still, some relevant conclusions can be extracted. The following issues need to be considered for MDUACs to be developed on Mediterranean urban regions similar to Madrid:

- 1) Understanding MDUAC theoretical background
- 2) The selection of the spatial resolution

3) Order and systematization of the calibration works

4) Spatial singularity of the neighbourhood rules

How much can land use change observation improve by counting with a detailed land use database?

The building process has been described during the MLU development for the Autonomous Community of Madrid, whose results will work as a base to develop other works in the same direction, especially those based on urban land use photo-interpretation. Furthermore, the capacity of CORINE Land Cover to analyze the urban land use change in Spain was assessed using this geodatabase (MLU). An accuracy lost over 50 per cent was revealed. In this sense, this work suggests the use of more accurate sources when analysing land use change dynamics in Europe in local scales (i.e. cities, municipalities).

What urban land use occupation and distribution general transformation patterns have happened in the metropolitan region of Madrid, during the first decade of the XXI century, when is observed at detailed scale?

The metropolitan region of Madrid perfectly matches with the indicated growth dynamics during these periods in quantitative terms. In summary, this means high population growth ratios, and even higher ratios of urban land growth (in the European context). In spite of this growth, which puts Madrid in the first posts of the European cities ranking growth, this work focussed principally in the type of urban expansion, the urban land use distribution, the scattered urban development and the type of implemented urban model, which was accentuated during the study periods (2000-2006, 2006-2009). In that way, the strengthen of a 'hybrid model', or something between the disperse urban growth (sprawl) and the compact urban development was unveiled in Madrid. A phenomenon that Catalán et al., (2008) had previously identified in the metropolitan region of Barcelona.

Which are the transition rules identified through a MDUAC that are defining urban land use change patterns in the Madrid region?

The identification of the transition rules that are defining the land use change patterns in the metropolitan region of Madrid are inherent to the weighted parameters that are mostly representing the neighbourhood interactions among the land uses. These rules are articulated on a competition framework of land occupation. The explanatory strength of the MDUAC is implicit in the dynamic simulation, which is driven by the values of the neighbourhood weights, and the coefficients and parameters empirically found for the transition function. All this information is collected and showed in the Annex I of this work.

What is the effect of changing the scale factors on an urban MDUAC?

The experiment concluded that the model is not dependent on the scale factor (in terms of resolution). This statement comprises an interesting contribution to the development of this kind of applications. In this sense, the results show that, once a model at a specific spatial resolution is validated, we can expect similar results when applying the same inputs, parameters (within a reasonable range size according to the mapped region) and calibration values to run another model.

Can cellular automata-based models be combined with predictive models, like those developed under the use of algorithms based on artificial neural networks?

The ANN applications are of great usefulness to estimate the suitability of a location to host a specific future land use according its last allocation pattern, which enhanced the interest of using this prototype in this research. Indeed, land suitability (the set of social, environmental and economic variables) is one of the factors within the MDUAC that have been assessed in this work, which evidences the opportunity of a further integration of both models, MDUAC-ANN.

2.4 General conclusions

Both the computing models and the management and geographic information analysis software are a remarkable support for explaining any spatial phenomena. This, that nowadays starts to seem a topic, becomes more solid today, together with the development of the complexity science, the computer capacity, and the algorithms to simulate multiple simple relationships among simple (i.e. land uses) or sophisticated (e.g. real states, drivers, students, builders...) agents distributed over the space conforming complex urban dynamics.

In many cases, as O'sullivan (2004) said, in Human Geography, all these new complexity arguments are new names for old thoughts. Still, even in that case, this work attempts to make a little contribution to the efforts to connect the geographic research with this new complex perspective through the MDUAC, even though, as in other similar efforts, its strength is dissipated in multiple practical and methodological appendixes. Anyway, all of them deal with the cities, the cellular automata and the complex systems.

Esta Tesis ha contado con financiación del Ministerio de Ciencia e Innovación, a través de una beca predoctoral asignada al proyecto “*Relaciones entre modelo territorial y movilidad metropolitana: análisis y modelización*” (TRA2008-06682/MODAL)

